ISSN 0181-0642

BULLETIN du MUSÉUM NATIONAL d'HISTOIRE NATURELLE

PUBLICATION TRIMESTRIELLE

SECTION C

sciences de la terre

paléontologie
géologie
minéralogie

4e SERIE T. 3 1981 N° 2

Avril-Juin 1981

BULLETIN
du
MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
57, rue Cuvier, 75005 Paris

Directeur : Professeur E. R. Brygoo

Fondé en 1895, le *Bulletin du Muséum d'Histoire naturelle* est devenu à partir de 1907 : *Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle*. Des travaux originaux relatifs aux diverses disciplines scientifiques représentées au Muséum y sont publiés. Il s'agit essentiellement d'études de Systématique portant sur les collections conservées dans ses laboratoires, mais la revue est également ouverte, depuis 1970 surtout, à des articles portant sur d'autres aspects de la Science : biologie, écologie, etc.

La *1re série* (années 1895 à 1928) comprend un tome par an (t. 1 à 34), divisé chacun en six fascicules regroupant divers articles.

La *2e série* (années 1929 à 1970) a la même présentation : un tome (t. 1 à 42), six fascicules par an.

La *3e série* (années 1971 à 1978) est également bimestrielle. Le *Bulletin* est alors divisé en cinq Sections et les articles paraissent par fascicules séparés (sauf pour l'année 1978 où ils ont été regroupés par fascicules bimestriels). Durant ces années chaque fascicule est numéroté à la suite (nos 1 à 522), ainsi qu'à l'intérieur de chaque Section, soit : Zoologie, nos 1 à 356 ; Sciences de la Terre, nos 1 à 70 ; Botanique, nos 1 à 35 ; Écologie générale, nos 1 à 42 ; Sciences physico-chimiques, nos 1 à 19.

La *4e série* débute avec l'année 1979. Le *Bulletin* est divisé en trois Sections : A : Zoologie, biologie et écologie animales ; B : Botanique, biologie et écologie végétales, phytochimie (fusionnée à partir de 1981 avec la revue *Adansonia*) ; C : Sciences de la Terre, paléontologie, géologie, minéralogie. La revue est trimestrielle ; les articles sont regroupés en quatre numéros par an pour chacune des Sections ; un tome annuel réunit les trois Sections.

S'adresser :

— pour les **échanges**, à la Bibliothèque centrale du Muséum national d'Histoire naturelle, 38, rue Geoffroy Saint-Hilaire, 75005 Paris, tél. 331-71-24 ; 331-95-60.
— pour les **abonnements** et **achats au numéro**, au Service de vente des Publications du Muséum, 38, rue Geoffroy Saint-Hilaire, 75005 Paris, tél. 331-71-24 ; 331-95-60. C.C.P. Paris 9062-62.
— pour tout ce qui concerne la **rédaction**, au Secrétariat du Bulletin, 57, rue Cuvier, 75005 Paris, tél. 587-19-17.

Abonnements pour l'année 1981

Abonnement général : 900 F.
Section A : Zoologie, biologie et écologie animales : 560 F.
Section B : Botanique, *Adansonia* : 280 F.
Section C : Sciences de la Terre, paléontologie, géologie, minéralogie : 180 F.

Numéro d'inscription à la Commission paritaire des publications et agences de presse : 1405 AD

BULLETIN DU MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
4e série, **3**, 1981, section C (Sciences de la Terre, Paléontologie, Géologie, Minéralogie), no 2

SOMMAIRE — *CONTENTS*

Bull. Mus. natn. Hist. nat., Paris, 4e sér., **3**, 1981,
section C, nº 2 : 159-181.

L'analyse minéralogique des sédiments pélagiques associés aux nodules polymétalliques par la spectrométrie d'absorption infrarouge

par François Fröhlich et Lucien Leclaire *

Résumé. — Un bref rappel du principe de l'utilisation du rayonnement infrarouge en spectrométrie permet de définir les bases d'une méthode d'étude qualitative et quantitative des minéraux majeurs des sédiments pélagiques et particulièrement de ceux constituant l'essentiel des dépôts associés aux nodules polymétalliques. L'exposé de la préparation des échantillons de sédiment brut à irradier est suivi d'une présentation de l'exploitation des mesures sur enregistrement graphique, à partir de substances pures, de leur mélange et à partir de sédiments pélagiques. Les difficultés de la méthode et les causes d'erreur sont examinées. Un tableau résume les différentes substances couramment identifiées en indiquant la précision des mesures (carbonates, oxydes, aluminosilicates « amorphes » et bien cristallisés, etc.). Il apparaît que cette méthode peut rendre les mêmes services que la diffraction des rayons X tout en étant plus aisée à mettre en œuvre et notamment mieux adaptée à l'étude des boues rouges des grands fonds.

Abstract. — Infrared (IR) spectroscopic investigations are used for many years in organic chemistry and mineralogy. In this paper, a new application of IR spectroscopy to pelagic sediments analysis is described. Owing to the abundance of poorly crystallized and amorphous constituents, X-Ray analysis are inadequate to the whole of minerals determination and ratio calculations (e.g. biogenous silica). On the other hand, IR spectroscopy allow to determine any substance, crystallized or amorphous, and to mesure its concentration in the sediment (Beer-Lambert law). Basic considerations in IR spectroscopy are summarized, with special reference to electromagnetic energy absorption by molecules. Such absorptions take place at specific frequencies which agree with the vibration frequencies of the molecules : chemical substances have specific IR spectra. Procedure and sample preparation are described for IR analysis of pelagic sediments, here by KBr pellet method (0,25 % sample mixed in KBr, with particles 2-3 µm in size). IR spectra of finely ground pelagic sediments show numerous absorption bands that allow to determine each constituent. Drawing a base-line is needed for concentration calculation. This base-line is often a straight line, and may be considered as the virtual spectrum of the mixture if the mesured component were absent. Some examples of artificial or natural (sediments) mixtures are given, with absorption bands suited for quantitative analysis and calibration curves establishment. IR spectroscopy appears to be a usefull tool for marine sedimentologists in routine analysis : easy use, quick determination of every pelagic component (crystallized or X-Ray amorphous), and accurate concentration calculation on the same spectrum.

---

* *Laboratoire de Géologie du Muséum national d'Histoire naturelle, 43, rue Buffon, 75005 Paris.*
Les travaux présentés dans cette note ont été subventionnés par la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique et ont fait l'objet du rapport de fin d'étude nº 77-7-1449.

I. — Introduction

Situation et conduite de la recherche

C'est probablement au cours de cette décennie qu'un effort particulier a été fait dans le but de déterminer avec plus de précision la nature des informations contenues dans les sédiments du fond des océans, relatives à l'évolution de l'environnement océanique. Il est apparu nécessaire, non seulement d'identifier tous les minéraux qui s'y forment et s'y déposent, mais aussi de mesurer avec le plus de précision possible leurs proportions relatives, voire leurs taux d'accumulation. Différentes méthodes ont été développées et mises en œuvre ; certaines apportant surtout des informations qualitatives : microscope électronique, diffraction électronique, sondages ioniques par exemple, d'autres visant la mesure des proportions relatives (en plus de l'identification spécifique) : microscopie à optique classique (estimation quantitative), la diffraction des rayons X, l'analyse thermique pondérale, etc. Deux d'entre elles ont été utilisées en routine pour l'analyse minéralogique des sédiments océaniques : l'estimation quantitative sur frottis au microscope classique et la diffraction des rayons X, à cause de la facilité de mise en œuvre et de la rapidité des mesures. Elles sont couramment utilisées de manière complémentaire pour l'étude de la minéralogie des sédiments à nodules polymétalliques. Cependant, la première présente l'inconvénient de laisser une trop grande part à la subjectivité des observations et ne permet pas de déterminer valablement le cortège des minéraux des argiles ; la deuxième, très efficace pour les minéraux bien cristallisés, est d'utilisation limitée pour les mélanges naturels à haute teneur en substances mal cristallisées, voire pratiquement « amorphes ». Or, il s'est avéré qu'une grande part des sédiments porteurs de nodules polymétalliques renferment ce type de produits mal cristallisés ou à cristallites en arrangement désordonné. Le décodage des informations contenues dans ces mélanges naturels et relatif aux propriétés particulières des environnements à dépôts métallifères devait donc faire appel, en plus, à d'autres méthodes. Nous avons choisi et proposé de tester la spectrométrie d'absorption dans l'infrarouge en raison des potentialités de cette méthode révélées auparavant en chimie organique et minéralogie descriptive (identification des espèces minérales). C'est à notre connaissance le premier essai d'extension de l'utilisation de cette méthode à l'analyse minéralogique quantitative des sédiments pélagiques.

La conduite de la recherche, qui est pour l'essentiel la mise au point de la méthode et l'analyse comparée de ses possibilités quant à l'étude des sédiments associés aux nodules polymétalliques, a été faite de manière habituelle : travaux sur substances pures de collection : calcite, quartz, aluminosilicates, silice amorphe, oxydes, etc., puis sur leur mélange (étalonnage) ; travaux sur sédiments bruts préalablement analysés par d'autres méthodes et, en particulier, par diffractométrie X : comparaisons de résultats, détermination des constantes et de l'effet « de matrice » ; essais d'appareils de marques et de performances diverses (du Perkin Elmer 577 au Pye Unicam SP 2000).

Les résultats obtenus ont débouché sur la définition d'un protocole de préparation des échantillons et sur la systématisation de l'analyse minéralogique quantitative des carbonates, aluminosilicates (sauf détritiques), oxydes et hydroxydes, silice des complexes, silice biogène, etc., entrant notamment dans la composition des boues rouges des grands

fonds. L'application intensive de cette méthode d'analyse à la minéralogie quantitative des sédiments pélagiques des grands fonds océaniques s'est concrétisée par une thèse de Doctorat d'État (Fröhlich, 1979).

II. — Généralités sur la spectroscopie d'absorption infrarouge

1. Rappel des propriétés du rayonnement infrarouge dans ses interactions avec la matière

La mesure de l'absorption du rayonnement infrarouge par la matière est utilisée couramment en chimie organique depuis une quarantaine d'années (cf. Avram et Mateescu, 1970), et en minéralogie depuis 1950 environ. Ce type de mesure est basé sur la perte d'énergie radiante due à la diffusion, mais surtout à l'absorption lors du passage d'un train d'ondes électromagnétiques à travers un milieu matériel. Pour ce qui est plus particulièrement des rayonnements du domaine infrarouge, peu énergétiques, ces phénomènes physiques obéissent à des lois précises :

— La perte par diffusion (ce terme ne comprend pas ici l'effet Raman) correspond surtout à des réflexions lors du passage des rayons dans un milieu d'indice de réfraction différent. Elles sont — tout au moins en théorie — très petites pour le domaine spectral qui nous intéresse.

— La perte par absorption, de loin la plus importante, est discontinue dans le spectre, et fonction de la longueur d'onde. Elle ne se produit que lorsque l'énergie de l'onde irradiante correspond précisément à l'énergie nécessaire pour faire passer les molécules rencontrées de l'état de vibration « normal » à un état de vibration excité. Cette transition — quantique — ne peut s'opérer par résonnance que lorsque la vibration implique une variation du moment dipolaire de la molécule (variation du champ électrique interagissant avec la vibration électromagnétique). C'est l'amplitude des vibrations moléculaires qui est alors affectée. L'énergie portée par l'onde étant fonction de sa fréquence, il s'ensuit qu'il n'y aura résonance que si la fréquence de l'onde radiante correspond à celle de l'un des modes de vibration de la molécule. Il y a alors *absorption* de l'énergie incidente, se traduisant par une diminution de l'amplitude de l'onde à mesure qu'elle progresse. L'oscillation des molécules à l'état excité est amortie par suite de collisions avec les voisines et transformée en chaleur, et elles reviennent à l'état vibratoire normal : le milieu est alors prêt pour une nouvelle absorption.

Les informations recueillies en spectroscopie infrarouge concernent donc la structure moléculaire des échantillons irradiés, puisque la fréquence des vibrations est déterminée par la masse des différents atomes constitutifs, leur nombre, la symétrie moléculaire, les distances interioniques, l'état de la matière, ... Le nombre des composantes de ces vibrations (ou « modes » de vibration) est lié à la symétrie moléculaire. En d'autres termes, les fréquences d'absorption du rayonnement infrarouge caractérisent des groupements chimiques, des radicaux et des liaisons, quel que soit l'état de la matière. Dans le cas des cristaux, viennent s'y ajouter les absorptions dues aux vibrations réticulaires. La théorie peut permettre de prévoir le type et le mode des vibrations actives en infrarouge, connaissant la nature des molécules, et par conséquent de déterminer les fréquences d'absorption (Lecomte, 1949 ; Avram et Mateescu, 1970).

2. Identification des minéraux entrant dans la constitution des sédiments pélagiques

Des groupements chimiques très répandus dans la nature, comme par exemple : $CO_3^=$, SiO_4, $SO_4^=$, OH^+, OH_2, ont toujours, quels que soient les radicaux qui leur sont associés, des fréquences de vibration propres bien connues et caractéristiques, permettant la différenciation des carbonates, sulfates, silicates, silice, hydroxydes, etc. En outre, un grand nombre de spectres de référence actuellement disponibles (Van der Marel et Beutelspacher, 1976) définissent les bandes d'absorption : les fréquences caractéristiques d'un grand nombre de minéraux purs, y compris les aluminosilicates. A défaut, il est toujours possible d'établir de manière systématique les spectres de référence par irradiation infrarouge de minéraux purs dont la nature a été précisée par la mise en œuvre d'autres méthodes. C'est ainsi que diverses substances ont déjà pu être étudiées en spectrométrie infrarouge : les carbonates (Louisfert et Pobeguin, 1952 ; Adler et Kerr, 1962 ; Chester et Ederfield, 1967 ; White, 1974), les sulfates (Ross, 1974), les oxydes et hydroxydes (Farmer, 1974 ; Perseil, 1968), la silice libre (Badia et Fröhlich, 1975) et les silicates à symétrie élevée ou possédant des groupements hydroxyles liés à leur structure (phyllites, zéolites, etc.).

Il est concevable que, partant de l'étude des substances pures (cristallisées ou non), il soit possible de passer à leur identification en mélanges complexes, ce qui a déjà été réalisé (Van der Marel, 1966 ; Chester et Ederfield, 1968 ; Flehmig et Kurtz, 1973), aussi bien pour des mélanges synthétiques que naturels.

3. Principe de la spectroscopie infrarouge quantitative

Si J est l'énergie transmise après traversée de la matière, J_0, l'énergie incidente émise par la source IR, on démontre aisément que :

$$J = J_0 . e^{-\alpha . l . c} \quad (1)$$

C'est la loi de Lambert-Beer. c = concentration de la substance à doser (en Moles/par litre) ; l = longueur du trajet optique (en cm) à travers la matière (épaisseur de la préparation) ; α = coefficient dit « d'extinction spécifique » caractérisant l'absorption du rayonnement électromagnétique monochromatique de fréquence ν pour un type de molécule donné. Ce coefficient est indépendant de la longueur du trajet optique et de la concentration. Cependant, et surtout dans le cas des solides, la loi de Lambert-Beer n'est applicable que pour des trajets optiques courts ou des concentrations faibles.

En pratique, on préfère utiliser les logarithmes décimaux. L'expression (1) devient alors :

$$J = J_0 . 10^{-\varepsilon . l . c} \quad (2)$$

Le terme $\varepsilon . l . c = A$ est nommé « Absorbance » :

$$A = \varepsilon . l . c = 0{,}4343 \, . \alpha . l . c = -\log \left(\frac{J}{J_0} \right)$$

Le rapport J/J_0 est appelé « Transmission » (T) et exprimé en %. Il vient alors :

$$A = \log\left(\frac{1}{T}\right), \text{ et d'après (2) : } c = \frac{A}{\varepsilon.l} = \frac{\log\left(\frac{1}{T}\right)}{\varepsilon.l} \quad (3)$$

La mesure de T (ou de A) se fait directement sur les enregistrements effectués par les spectres IR. Il est à noter qu'en logarithmes décimaux, le coefficient ε est appelé « coefficient d'extinction molaire » et s'exprime en $l.mol^{-1}.cm^{-1}$.

En théorie, le spectre d'absorption devrait donc se traduire sur les enregistrements par une série de *raies* très fines, dont la hauteur représenterait la Transmission aux fréquences précises ν correspondant aux modes de vibration des molécules. En fait, même les appareils modernes ne permettent pas d'obtenir une dispersion suffisante du spectre, avec sélection d'ondes monochromatiques, et on enregistrera en réalité les variations de la Transmission dans un domaine de fréquences plus ou moins étroit autour de la fréquence fondamentale ν ; les raies seront élargies. De plus, la sélection de ces étroits domaines spectraux nécessite la focalisation des faisceaux IR sur des fentes de dimention finie, ce qui contribue encore à élargir les raies. On n'observera plus alors sur les spectres que des raies larges que l'on nomme « bandes d'absorption ». En particulier dans le cas de l'analyse des solides, des absorptions multiples à des fréquences très voisines n'étant pas résolues, les larges bandes d'absorption observées ne seront souvent que l'enveloppe de plusieurs bandes fondamentales confondues.

On ne prendra donc en considération que les minima de Transmission, qui correspondent aux phénomènes physiques majeurs. Par approches successives, on a pu, en effet, pour la majorité des corps, réussir à attribuer ces minima de Transmission à des modes de vibration prévus par le calcul.

4. La spectroscopie infrarouge en fréquences variables

Le domaine spectral couvert par nombre d'appareils modernes va, en longueurs d'ondes, de 2,5 μm à 50 μm. Sont donc concernés une faible partie de l'infrarouge proche (entre 2,5 et 3 μm), la totalité de l'infrarouge moyen (entre 3 et 15 μm) et une bonne part de l'infrarouge lointain (ici, de 15 à 50 μm). Pour des raisons pratiques, on utilise à présent de préférence aux longueurs d'onde, une échelle en « nombre d'ondes » (nombre d'ondes par cm), qui équivaut à une fréquence, et dont l'unité est le cm^{-1} :

$$\nu\ (cm^{-1}) = \frac{10\,000}{\lambda\ (\mu m)}$$

L'analyse spectroscopique d'un sédiment brut suppose un balayage continu en fréquences dans ce domaine spectral, de manière à pouvoir disposer en une seule opération, à partir d'une même préparation et sur le même enregistrement, de la totalité des fréquences d'absorption dans la gamme utile. Cette opération est rendue possible sur les spectromètres infrarouge à l'aide d'un dispositif à réseaux tournants. L'échantillon étant irradié par un faisceau polychromatique issu d'une source dont le spectre d'émission se rapproche le plus possible de celui d'un corps noir, la sélection des fréquences est effectuée après traversée de l'échantillon. L'enregistrement en continu des absorptions au cours du balayage de cette

gamme de fréquences donne leur position précise (en cm^{-1}) et leur intensité (en % de Transmission ou en Absorbance, si l'appareil est muni d'un intégrateur logarithmique). Pour les mélanges complexes de substances que sont les sédiments, il est à prévoir de nombreuses bandes d'absorption très voisines, voire superposées. Il en résulte généralement un certain « flou », le tracé montrant des bandes d'absorption plus ou moins bien centrées sur une ou deux fréquences de référence. C'est avec l'inconvénient de la superposition, c'est-à-dire de l'addition des absorptions, la difficulté principale dans l'interprétation des spectres obtenus.

On reviendra sur les précautions à prendre pour détecter d'éventuelles additions et définir correctement T_0 (voir paragraphe précédent), soit à l'occasion du tracé manuel de la « ligne de base » (ligne de référence pour une substance donnée et à une fréquence donnée), soit par le calcul.

III. — L'analyse minéralogique des sédiments pélagiques par spectrométrie d'absorption infrarouge

1. Particularités de l'analyse des substances solides pulvérisées

En minéralogie, l'analyse infrarouge des cristaux devrait théoriquement être faite soit par transmission sur des lames cristallines ultra-fines, soit par réflexion sur des faces cristallines (voir Lecomte, 1949). Dans la très grande majorité des cas, on ne peut façonner de préparations suffisamment minces, et les cristaux doivent être réduits à l'état de poudres fines. Pour les sédiments, il va de soit que cette préparation est obligatoire (voir paragraphe suivant).

La loi d'absorption ayant été établie pour des solutions, nous nous trouvons ici dans un cas particulier avec des particules solides dispersées dans un milieu homogène d'indice de réfraction différent. Entrent en effet en jeu des phénomènes de réflexion possible à la surface des particules (dus au changement d'indice), et de diffaction lorsque la taille des particules est de l'ordre de grandeur des longueurs d'onde (ici, pratiquement entre 3 µm et 50 µm). Il a été montré, en introduisant des paramètres tels que le volume des particules, leur masse, leur densité et les indices de réfraction, que la loi de Lambert-Beer restait valable dans le cas de particules de petite taille en regard de la longueur d'onde (Duyckaerts, 1959).

Autrement dit, les deux phénomènes perturbateurs essentiels dans l'analyse des poudres en infrarouge (diffraction et réflexion) deviennent négligeables dans les calculs si le diamètre des particules est inférieur à 2-3 µm, leur concentration faible dans le milieu dispersant, et leur répartition homogène. Dans ce cas, la loi d'absorption est applicable sous sa forme fondamentale (1). Compte tenu des différents paramètres négligés ici — mais intégrés dans le coefficient ε — on ne mesurera qu'une *Absorbance apparente*, dont la signification physique n'est pas rigoureuse, mais qui autorise le calcul des concentrations dans les mélanges minéraux, ainsi que la reconnaissance des espèces minérales. Pour les sédiments pélagiques à grain le plus souvent très fin, les problèmes éventuels de broyage et d'échantillonnage sont dès l'abord en grande partie résolus : la fraction silicatée est le plus généralement inférieure à 2 µm, tandis que l'essentiel des carbonates (nannofossiles) a déjà un grain de quelques micromètres, ce qui est peu par rapport aux longueurs d'onde des absorptions fondamentales

utilisées pour le calcul des concentrations (entre 12 et 25 µm). Certains sédiments (argileux, par exemple) pourraient être ainsi analysés sans broyage préalable.

2. Préparation des échantillons

S'agissant de l'analyse d'un mélange de particules solides, il est nécessaire d'inclure un prélèvement suffisamment représentatif du sédiment dans un diluant présentant la meilleure transparence possible (l'Absorbance la plus faible). On peut utiliser un liquide d'indice comme l'hexachlorobutadiène dans une cellule à fenêtres de KBr, méthode utilisée avec un appareil Perkin Elmer 577. La préparation qui a été retenue pour les travaux en routine est l'inclusion d'un prélèvement de sédiment dans du KBr (appareil utilisé : Pye Unicam SP 2000). Le KBr, comme tous les halogénures, est transparent aux infrarouges : Absorbance de l'ordre de 0,04 (due surtout aux pertes par réflexion sur les surfaces de la préparation), sauf aux grandes longueurs d'onde (fig. 1). Ce sel présente en outre des propriétés plastiques permettant un moulage finement reproductible des préparations sous la forme de pastilles dont la dimension et, en particulier, l'épaisseur (trajet optique) sont maintenues constantes.

La concentration des substances à doser et mélanger au KBr dépend des objectifs visés et de la nature des phases minérales majeures irradiées. Généralement, on recherche un compromis en partant des considérations suivantes :

— La concentration du sédiment dans le KBr ne doit pas être trop forte, de manière à pouvoir effectuer le plus grand nombre de mesures sur les enregistrements graphiques, en domaine à Absorbance moyenne ou faible. On réduit ainsi l'importance des erreurs commises notamment à la lecture de T_0, qui se répercutent de manière logarithmique sur les mesures de c (voir (3)).

— La concentration doit être suffisamment élevée pour que la quantité de matière irradiée permette une bonne représentativité du sédiment et une précision acceptable de l'analyse quantitative.

En outre, le traitement de l'échantillon brut, préalablement à son inclusion dans le KBr, doit être standardisé au maximum : en particulier le séchage et le broyage. Il convient d'éliminer l'eau non liée et de contrôler les résultats du broyage.

Le protocole finalement adopté pour les sédiments pélagiques est le suivant :

— séchage de l'échantillon à 60° pendant 48 heures (le séchage à 105° pendant 24 heures donne des résultats équivalents dans la plupart des cas) ;

— broyage de 500 mg en milieu volatile, de manière à éviter toute modification structurale par contrainte mécanique (Farmer, 1968). Le broyage à main est possible, mais le broyage mécanique est recommandé, par exemple à l'aide du Specamill 6000 à mortier et bille d'agate (durée et amplitude réglables). La durée et la force du broyage doivent être déterminées par les utilisateurs en fonction des résultats obtenus, contrôlés au microscope classique et au microscope électronique.

— fabrication d'une pastille à partir d'un mélange KBr — échantillon soigneusement homogénéisé. La concentration retenue est de 0,25 % soit, pour 2 g de préparation, une prise de 5 mg de sédiment. Les pastilles sont obtenues par pressage de 300 mg de mélange sous vide, à une pression de 11 T/cm^2 pendant une minute (Badia, 1974) et ont 13 mm de dia-

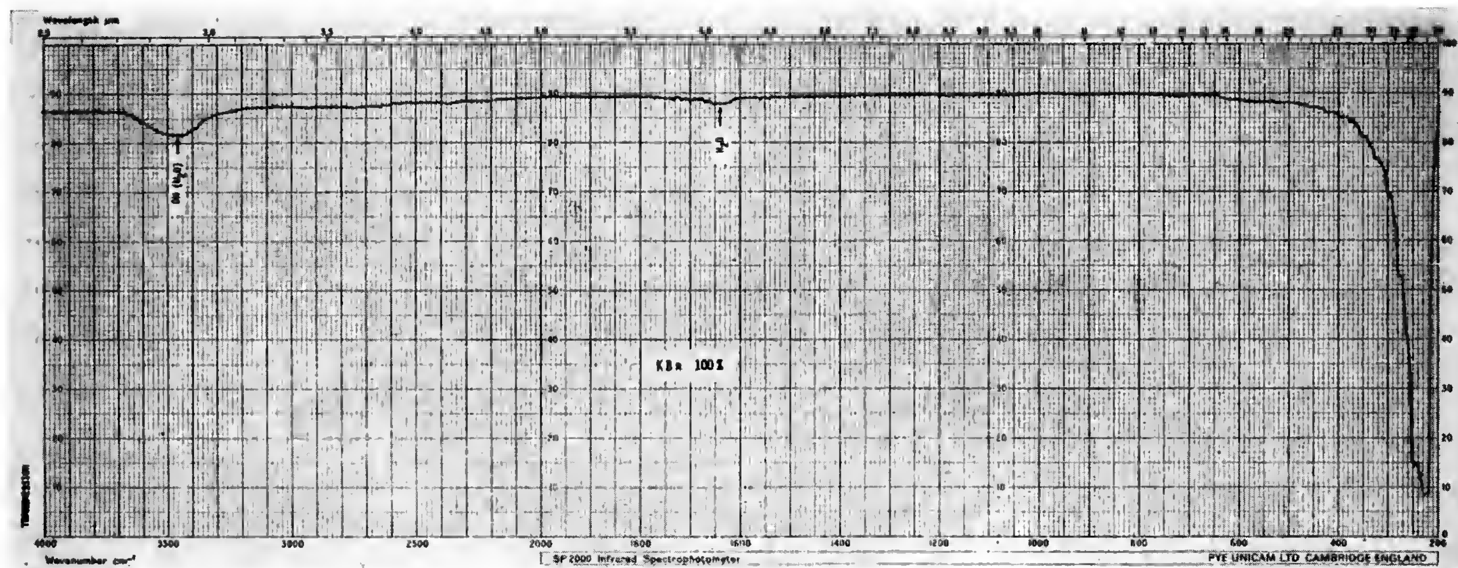


Fig. 1 (voir texte).

mètre pour environ 0,83 mm d'épaisseur. La précision des mesures et leur reproductibilité dépend d'un contrôle strict de la masse et de l'épaisseur de cette préparation qui doit en outre présenter une dispersion correcte des particules dans le KBr. Les poudres fines, en particulier les « argiles », réabsorbent toujours une certaine quantité d'eau (vapeur d'eau de l'air ambiant), très gênante pour l'étude des argiles (absorption parasite dans le domaine des vibrations des OH) ; il est nécessaire de faire séjourner la pastille à 105° (par exemple) pendant quelques heures (FARMER, 1968). Pour les sédiments pélagiques, les préparations doivent être maintenues pendant 48 heures à l'étuve en raison de l'importance des alumino-silicates « amorphes » à forte capacité de réhydratation. Ce traitement est basé sur le fait que la microporosité du disque de KBr permet l'évacuation de l'eau réabsorbée par les poudres stockées ou empêche toute réhydratation avant analyse (ce qui peut aussi être obtenu par stockage prolongé sous vide en présence d'un déshydratant).

3. **Principe de l'étalonnage et dépouillement des enregistrements**

a — *Exemples d'absorption de minéraux purs*

— *Localisation des fréquences d'absorption* : elle se fait par lecture directe de l'enregistrement sur papier calibré.

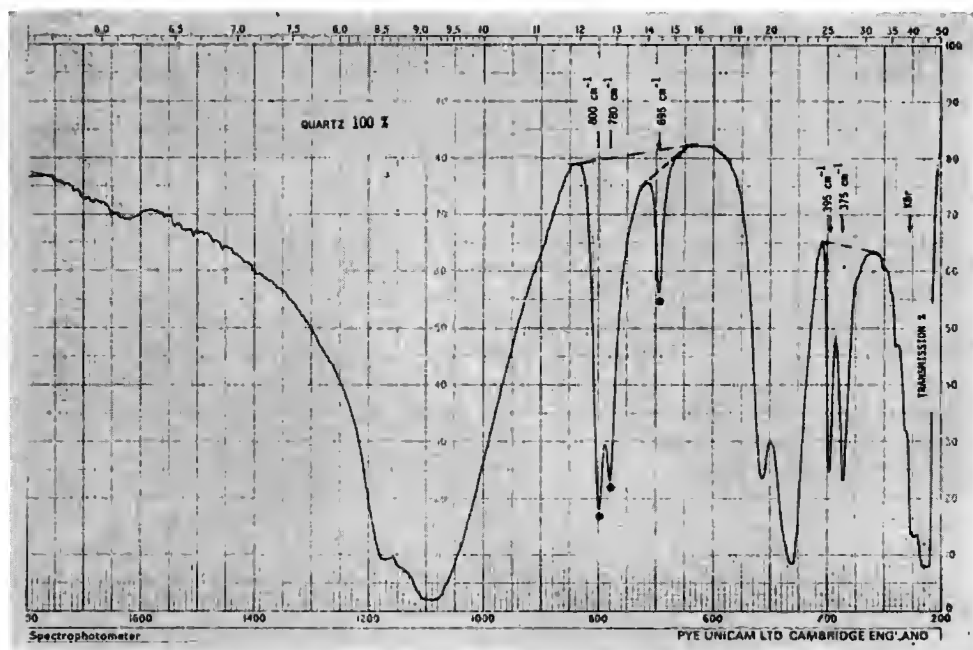


FIG. 2. — Spectre IR d'une poudre de quartz pur. Les points indiquent les fréquences retenues pour la mesure de l'absorption.

La figure 1 montre que le KBr est pratiquement transparent aux infrarouges puisque l'on obtient une Transmission de l'ordre de 90 %, sauf pour les basses fréquences où une bande d'absorption forte apparaît centrée sur 220-230 cm^{-1} (T = 8,6 %, A = 1,06). De

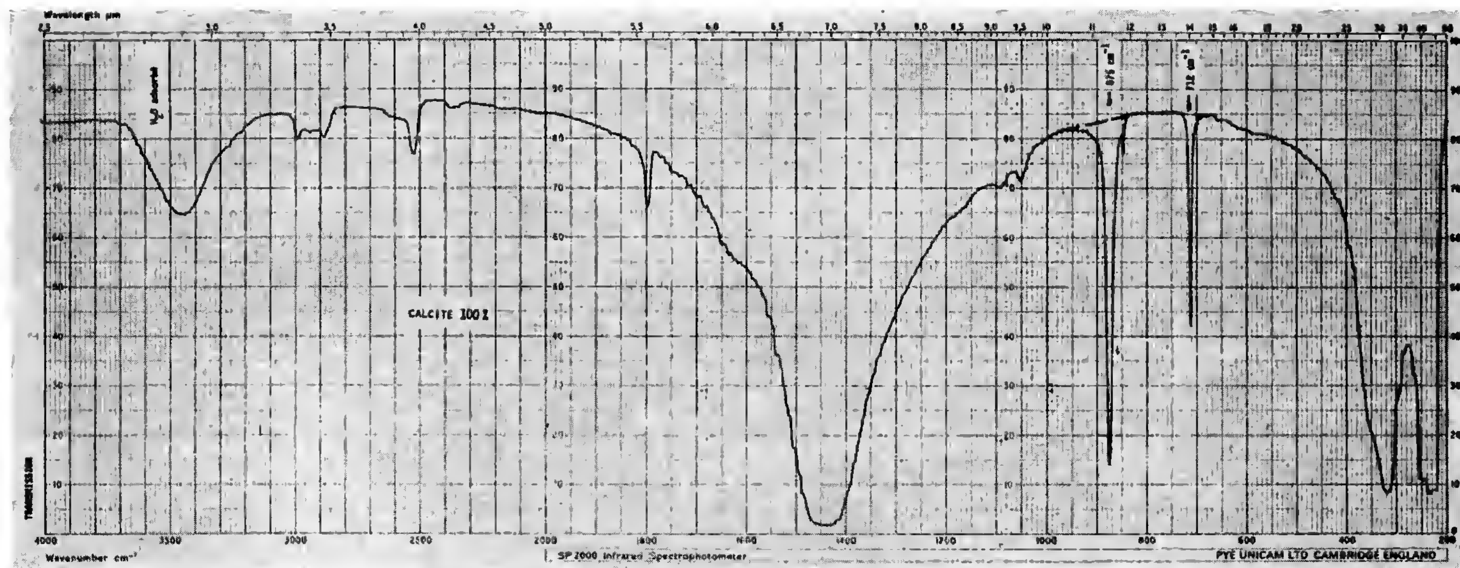


FIG. 3. — Spectre IR de calcite pure (voir texte).

faibles bandes d'absorption apparaissent aussi vers 1640 et 3 450 cm-1 et correspondent respectivement à des fréquences d'absorption de H_2O et OH (OH_2) dues à l'eau non évacuée par défaut de chauffage en étuve.

La figure 2 illustre les fréquences d'absorption du quartz pur (0,25 % dans le KBr) avec deux très larges bandes mal définies vers 1 085 et 1 170 cm-1 en particulier, et trois bandes très fines correspondant aux fréquences 695 cm-1, 780 cm-1 et 800 cm-1. Remarquons que l'enregistrement sur papier du commerce (calibré ou non) se présente avec un axe des ordonnées gradué en Transmission croissante de 0 à 100 % et rend compte des phénomènes d'absorption par des dépressions à partir d'une ligne de référence ou « ligne de base » calée sur $T_0 = 80$ % environ (fig. 2) ; c'est la représentation habituelle en spectrométrie infrarouge. On pourrait tout aussi bien représenter le phénomène en Absorbance croissante sur l'axe des ordonnées et ainsi obtenir des renseignements se rapprochant davantage de ceux issus notamment de la diffractométrie des rayons X, avec des « pics » localisant les fréquences d'absorption.

La figure 3 présente les résultats obtenus à partir d'une poudre de calcite pure (0,25 % dans le KBr) ; on peut observer les deux fréquences d'absorption de la calcite particulièrement intéressantes (712 et 875 cm-1) et une bande très large centrée sur 1 425 cm-1. La figure 4 montre les fréquences d'absorption de l'opale (très voisines de celles de la silice biogène : Radiolaires et Diatomées) avec deux bandes bien définies à 472 et 790 cm-1.

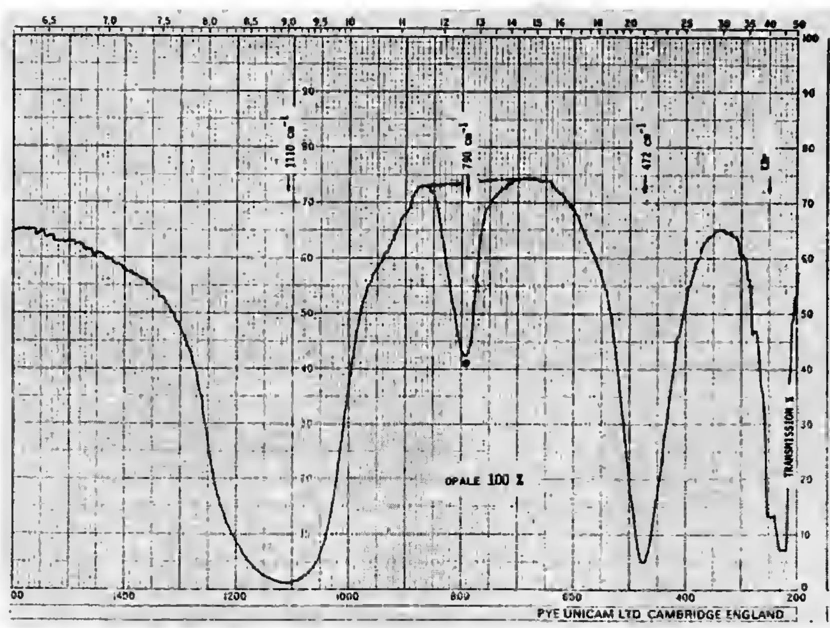


Fig. 4. — Spectre IR d'une poudre d'opale de collection (voir texte).

— *Détermination de T_0, tracé de la ligne de base et calcul du « coefficient d'Absorbance »* $\varepsilon.l$ (ε : coefficient d'extinction molaire).

Par rapport au KBr pur (fig. 1), dans les trois cas présentés ci-dessus, T_0 n'est pas la

Transmission du KBr, mais sensiblement plus faible (entre 80 % et 90 % en moyenne). Ceci est dû à un effet dit de « matrice » en relation avec la poudre introduite dans le KBr. Il n'y a donc plus accès direct à l'Absorbance ; il faut au préalable mesurer T et déterminer T_0 (fig. 5). Pour ce faire, on effectue le tracé de ce que les auteurs appellent une ligne de base (Lecomte, 1949 ; Van der Mabel, 1966 ; Chester et Ederfield, 1968 ; Price 1973 ; Flehmig et Kurze, 1973). Généralement, cette ligne de base est correctement obtenue en traçant la tangente commune aux épaulements encadrant la bande d'absorption (fig. 2, 3 et 4). Mais il arrive fréquemment, en mélanges complexes, que l'on soit dans l'obligation d'interpréter davantage en recherchant, par exemple, le symétrique d'une bande d'absorption majeure sur le flanc de laquelle se « greffent » plusieurs absorptions secondaires proches. La fréquence d'absorption spécifique étant déterminée, on obtient T_0 et, partant, la concentration étant égale à 1 (substances pures), ε.l.

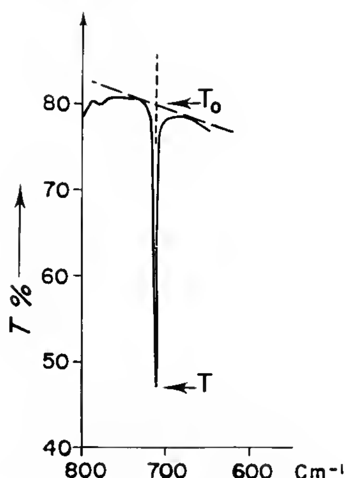


Fig. 5. — Construction de la ligne de base pour le calcul de l'Absorbance et de la concentration. Bande à 714 cm^{-1} de la calcite. (D'après Fröhlich, 1979.)

Remarquons que ce coefficient dépend de la fréquence et que, dans la mesure où il est déterminé pour les deux ou trois bandes d'absorption les mieux définies pour chaque minéral, la mesure de la concentration pourra se faire *indépendamment sur l'une ou l'autre fréquence*, ce qui permet d'intéressants recoupements et vérifications.

— *Droites d'étalonnage et « effet de matrice ».*

La détermination de ε.l telle qu'elle vient d'être évoquée ne saurait satisfaire aux impératifs de mesures rigoureuses. Il est nécessaire de vérifier la loi physique de base en faisant varier la concentration de substances en présence de mélanges de natures diverses.

L'exemple de la figure 6 montre que pour le quartz mesuré sur ses trois bandes d'absorption caractéristiques en présence de montmorillonite, la relation concentration-Absorbance est parfaitement linéaire, les différents coefficients d'Absorbance étant fournis par la pente des droites.

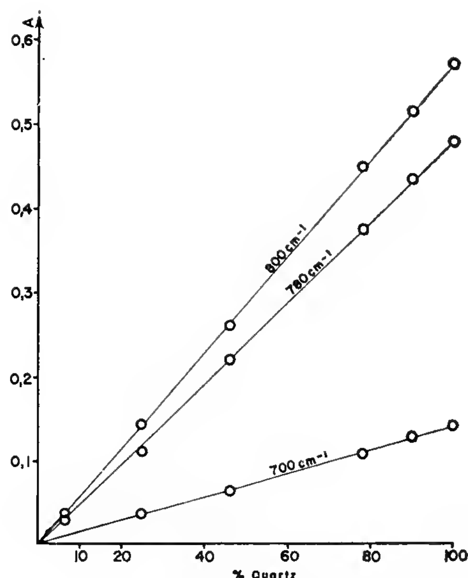


FIG. 6. — Variation de l'Absorbance en fonction de la concentration pour trois bandes d'absorption caractéristiques du quartz, en matrice argileuse. Mélange dosé quartz-montmorillonite. Les points sont alignés suivant des droites passant par l'origine des axes et constituant des droites-étalon pour chacune des trois bandes d'absorption. (D'après FRÖHLICH, 1979.)

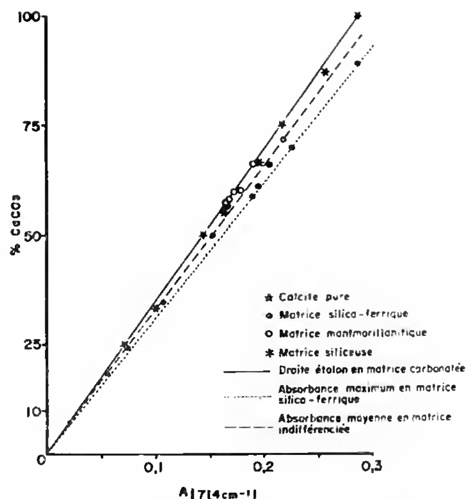


FIG. 7. — Effet de matrice dans le calcul des concentrations de la calcite (bande d'absorption à 714 cm^{-1}). La droite-étalon en matrice carbonatée a été obtenue pour des mélanges artificiels. Les teneurs en calcite des autres points sont connus par calcimétrie. On remarque que l'effet de matrice est beaucoup plus sensible en présence de complexes silico-ferriques (limite extrême figurée en pointillés). Pour une analyse rapide, on peut utiliser une droite-étalon intermédiaire (en tirctés sur la figure) donnant une erreur maximum de $\pm$ 5 %. Mais, dans une matrice déterminée, l'erreur relative est plus faible (1 % environ par rapport à la calcimétrie ; 0,5 % pour les mélanges prédosés). (D'après FRÖHLICH, 1979.)

L'exemple de la figure 7 met en évidence les variations des coefficients de la calcite à 714 cm^{-1}, variations dues à l' « effet de matrice » dépendant de la nature et des propriétés physiques du cortège minéralogique en présence.

Le tableau I rassemble quelques coefficients ε.l utilisés pour l'analyse des sédiments pélagiques.

TABLEAU I (voir texte).

MINÉRAL	NOMBRE D'ONDES	ε.l
Calcite	712	0,304
Quartz	800 780 700	0,5681 0,4820 0,1430
« Complexes silico-ferriques »	3 420 1 030	0,180 1,300
Smectites ferrifères	3 590 1 025	0,112 1,17
Kaolinite	3 700 3 620 1 030 695	0,49 0,144 1,18 0,1773
Opale	792	0,2388
Silice biogène	795	0,190

b — *Exemples de spectres d'absorption obtenus à partir de mélanges synthétiques*

— *Quartz-calcite (25-75 % et 75-25 %)* : Les figures 8 et 9 résument le principe de la mesure quantitative des proportions du mélange sur les meilleures bandes d'absorption. Ce cas, certes idéal, illustre la possibilité d'effectuer valablement les mesures indifféremment sur l'une ou l'autre des bandes caractéristiques.

TABLEAU II (voir texte).

MINÉRAL	FRÉQUENCES DE MESURES cm^{-1}	CONCENTRATIONS MESURÉES A PARTIR D'UN MÉLANGE 25-75 %	
Quartz	800 780 695 395 375	0,241 0,237 0,238 0,254 0,241	0,738 0,744 0,744 0,751 0,749
Calcite	877 712	0,247 0,247	0,746 0,743

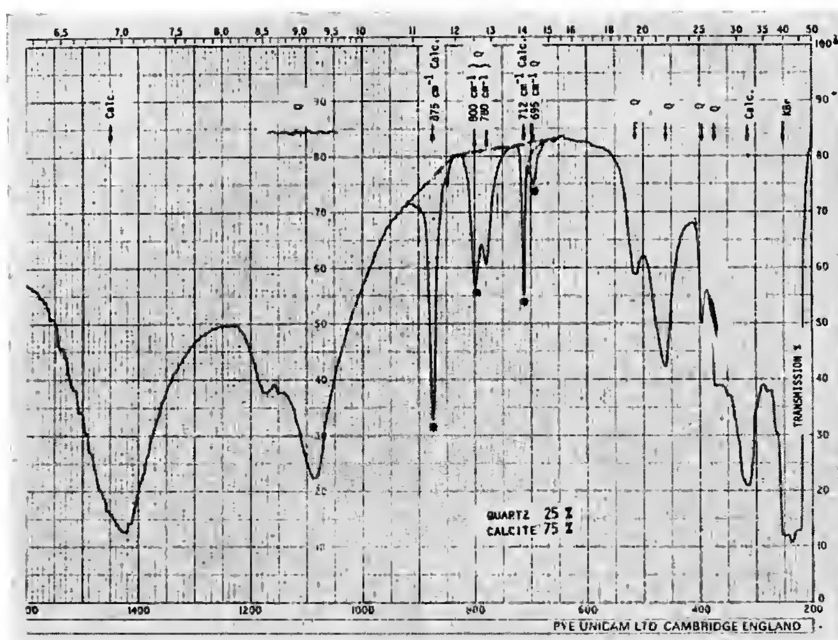


Fig. 8 (voir texte).

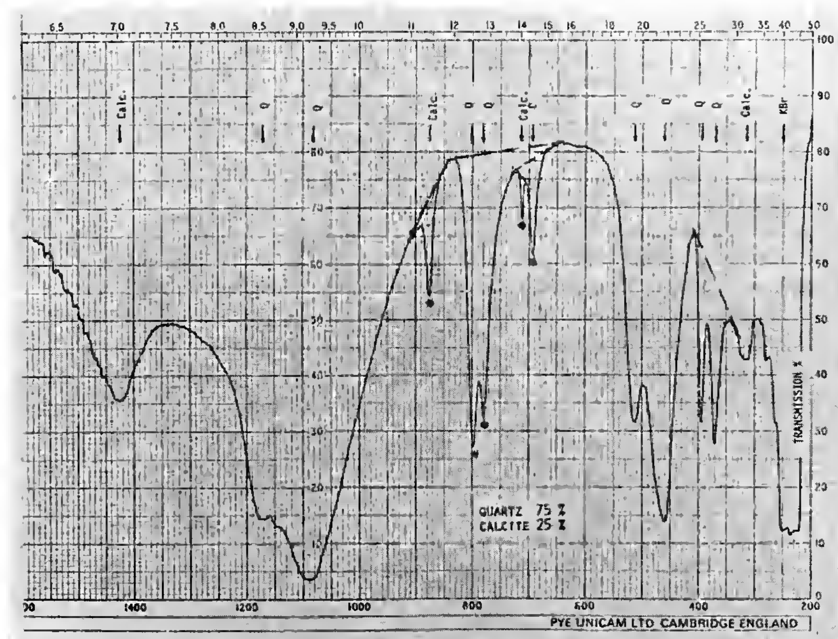


Fig. 9 (voir texte).

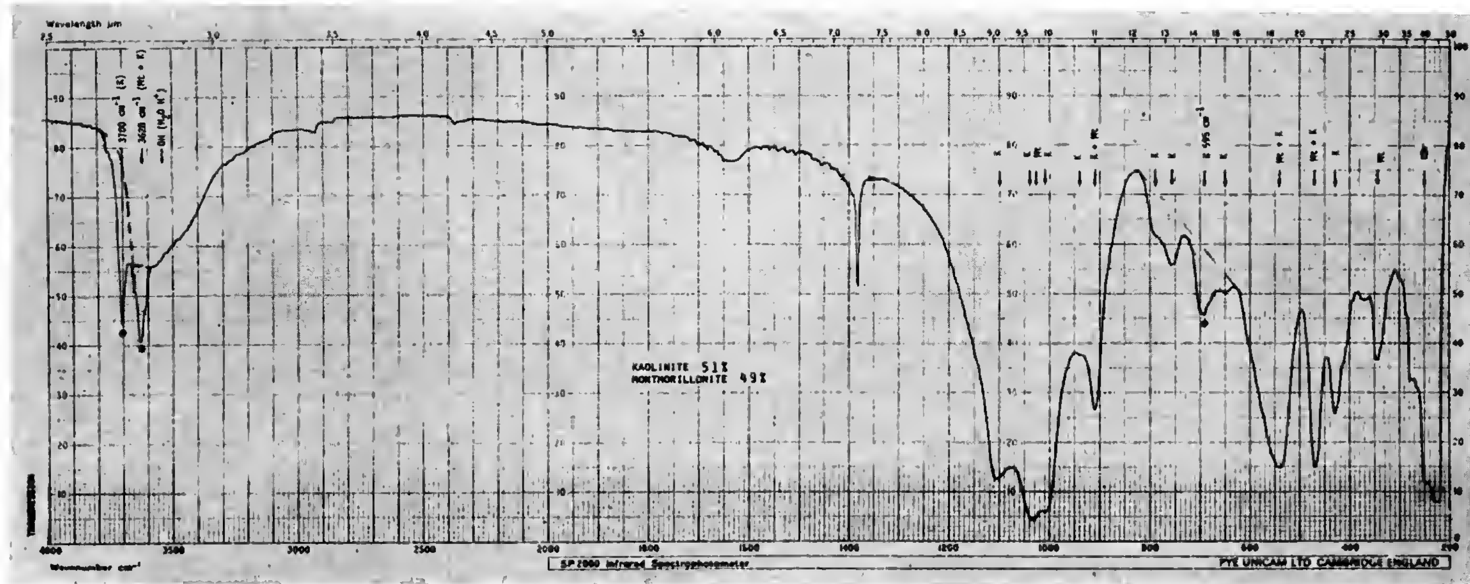


Fig. 10. — Spectre IR d'un mélange kaolinite-montmorillonite. Les points indiquent les fréquences de mesure.

— *Kaolinite-montmorillonite (50 %)* (fig. 10) : Les mesures portent sur les bandes à 3 700 et 695 cm^{-1} pour la kaolinite, 3 628 cm^{-1} pour la montmorillonite. De plus, il est tout à fait possible d'utiliser les bandes à 468, 640 et 910 cm^{-1} pour la somme kaolinite + montmorillonite. Cet exemple illustre la possibilité d'utiliser l'additivité des Absorbances dans le contrôle des mesures faites sur des bandes de fréquences spécifiques.

3. L'analyse des sédiments pélagiques

Le passage de mélanges simples aux mélanges naturels, c'est-à-dire à l'analyse minéralogique quantitative des sédiments pélagiques, demande quelques précautions et une certaine expérience. Si pour le quartz, la calcite, la kaolinite, les phosphates, etc., il n'y a généralement pas de difficultés particulières, par contre le dosage de smectites (ferrifères par exemple), en présence d'aluminosilicates très mal cristallisés, de complexes silico-ferriques (et vice versa), reste délicat. Il en va de même pour le dosage de la silice biogène (amorphe) en présence de grandes quantités de quartz et de complexes silico-ferriques. Il y a, en effet, de nombreuses superpositions de bandes d'absorption spécifiques, bandes qui sont pour certaines substances (oxy-hydroxydes, complexes amorphes) mal définies. Les difficultés résident généralement dans la détermination de T_0, c'est-à-dire dans le tracé de la ligne de base.

On se contentera de préciser ici certaines de ces difficultés, en montrant comment les résoudre ; pour plus de détails relatifs en particulier aux spectres totaux des sédiments pélagiques, le lecteur voudra bien se reporter aux travaux antérieurs de l'un d'entre nous (Fröhlich, 1977, 1978 et 1979).

a — *L'association « complexes silico-ferriques » (amorphes aux rayons X) — smectites ferrifères*

C'est un cas pour lequel les bandes d'absorption sont superposées mais relativement bien résolues à des fréquences différentes. Le tracé de la ligne de base de la très large bande d'absorption centrée sur 3 420 cm^{-1} et caractéristique des complexes silico-ferriques « amorphes » (fig. 11 ; Fröhlich, 1980) ne présente pas de difficultés. Cependant, vers 3 590 cm^{-1}, il apparaît une absorption supplémentaire littéralement greffée sur la précédente : on a pu vérifier que cette absorption était due aux OH structuraux des smectites ferrifères (fig. 12). La partie intéressante du spectre de cette association peut être représentée sous la forme du tracé de la figure 13, la ligne de base de l'association ayant été amenée sur l'axe des abscisses avec, par conséquent, T_0 à l'origine. La discrimination quantitative des deux constituants se fait à l'aide d'un spectre de complexes « purs » sans smectites (vérification faite par d'autres méthodes), dont le tracé (fig. 13A) constituera la ligne de base pour la détermination de T_0 des smectites à 3 590 cm^{-1}. La différence d'Absorbance entre 3 100 et 3 300 cm^{-1}, lorsqu'on compare A et B (fig. 13), serait due aux vibrations de OH des oxy-hydroxydes métalliques présents dans l'échantillon B (boue rouge), mais non décelables dans l'échantillon A (boue carbonatée). Il est préférable d'effectuer cette discrimination pour de fortes Transmissions (T), de manière à réduire le plus possible l'incidence des incertitudes du tracé de la ligne de base sur le calcul de l'Absorbance (fonction logarithmique de T).

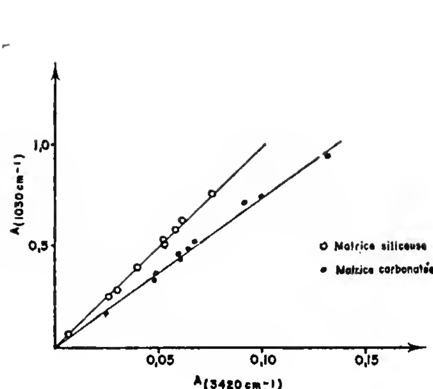


Fig. 11

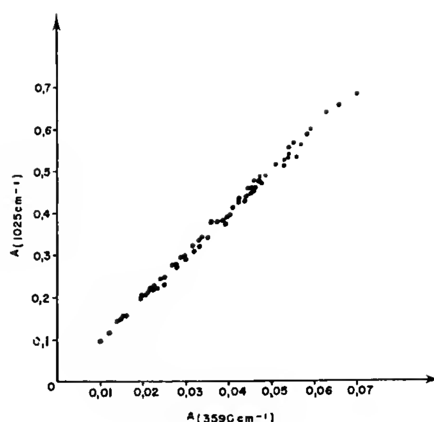


Fig. 12

Fig. 11. — *Absorbance des complexes silico-ferriques « amorphes ».* Corrélation entre les Absorbances mesurées pour deux fréquences : 3 420 cm^{-1} (H_2O liée) et 1 030 cm^{-1} (Si-O) à partir de deux faciès pélagiques : boues biosiliceuses et boues carbonatées pratiquement dépourvues de phyllites et de zéolites. Les deux fréquences sont caractéristiques de ces deux substances très mal cristallisées. (D'après Fröhlich 1979.)

Fig. 12. — *Absorbance des smectites ferrifères.* Corrélation entre les Absorbances mesurées sur 3 590 cm^{-1} (OH) et 1 025-1 030 cm^{-1} (liaison Si-O) à partir d'un échantillonnage représentatif des différents faciès de la sédimentation pélagique dans l'océan Indien. L'Absorbance des OH a été reconnue comme caractéristique des smectites ferrifères. L'Absorbance à 1 025-1 030 cm^{-1} a été obtenue indirectement : par soustraction de A à 3 420 cm^{-1} (concentration des complexes amorphes, voir fig. 11), à 3 700 cm^{-1} (concentration de la kaolinite), de A à 3 628 cm^{-1} (concentration de la montmorillonite, voir fig. 10). A remarquer que la règle de l'additivité des Absorbances est particulièrement satisfaisante ici. (D'après Fröhlich, 1979.)

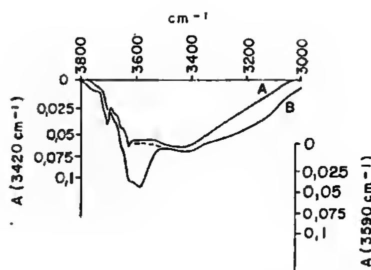


Fig. 13. — Établissement de la ligne de base (tracée en tiretés) pour la bande d'absorption OH à 3 590 cm^{-1} des smectites ferrifères (B). Cette ligne est tracée d'après le contour de la bande d'absorption ($OH-H_2O$) des complexes silico-ferriques amorphes en l'absence de smectites ferrifères (A). Pour les deux spectres A et B, la teneur en complexes amorphes est très voisine. L'Absorbance de la bande H_2O (3 420 cm^{-1}) est proche, et la profondeur de ces bandes est comparable sur le graphique car elles ont une même ligne de base (89 % T, ligne que l'on a confondue avec l'axe des fréquences). L'échelle d'Absorbance dans les conditions de la figure est représentée à gauche pour les complexes amorphes (3 420 cm^{-1}, T_0 = 89 %) et à droite pour les smectites ferrifères (3 590 cm^{-1} ; T_0 = 78 %). (D'après Fröhlich, 1979.)

b — *Les associations silice-silicates et le problème de la discrimination de constituants différents absorbant à la même fréquence ou à des fréquences très voisines*

Sans l'utilisation d'autres fréquences, il serait impossible de mesurer les concentrations respectives de smectites ferrifères, de kaolinite et de montmorillonite (en mélanges) à 1 025-1 030 cm^{-1}, fréquences d'absorption communes à de très nombreux silicates. En outre, et bien qu'il soit préférable lorsque cela est possible, de mesurer les complexes à 1 025 cm^{-1}, il est nécessaire d'approcher cette mesure indirectement en utilisant la fréquence d'absorption de l'eau liée à cette substance, lorsque d'autres aluminosilicates sont présents (fig. 11 et 12). Ceci suppose un grand soin dans la préparation de l'échantillon au niveau de l'extraction de l'eau d'imbibition. Constatons cependant la bonne corrélation des mesures comparées (fig. 12) et une bonne sensibilité dans la mesure des Absorbances à 3 420 cm^{-1} (fig. 14).

Une même approche est faite pour le dosage du quartz en présence de fortes proportions de silice biogène (absorption vers 800 cm^{-1}) de kaolinite (700 cm^{-1}). Dans ces conditions, la détermination de l'Absorbance de la silice biogène nécessite la mesure de la concentration du quartz sur les fréquences de 780 et 700 cm^{-1}, concentration qui est soustraite de l'Absorbance totale : quartz + silice biogène à 800 cm^{-1}. La caractérisation de la présence (vérifiée au microscope) et de la concentration de faibles quantités de silice biogène passe par ce type de calcul. Un cas analogue se rencontre lorsque, par exemple, la montmorillonite est présente en faible concentration et en présence de complexes amorphes, de carbonates et de kaolinite.

Ces opérations de dépouillement ont été conduites pour l'interprétation des deux parties des spectres de sédiments bruts (3 faciès types) représentés dans les figures 14 et 15.

4. Difficultés, particularités et précision de la minéralogie quantitative des sédiments pélagiques en spectrométrie infrarouge

Les principales difficultés qui transparaissent dans les pages qui précèdent résident dans la détermination de la « ligne de base », c'est-à-dire la mesure de T_0, en cas de superpositions et d'additions multiples. Par ailleurs, lorsque la pente de cette ligne de base est trop forte ou qu'elle ne peut être représentée par une droite, mais doit être tracée en courbe, les risques d'erreurs sur T_0 deviennent non négligeables, surtout par transmissions moyennes, à fortiori faibles. Cependant, la possession d'un grand nombre de mesures sur substances étalons diverses, introduites dans les différents faciès sédimentaires rencontrés, permet de résoudre valablement ces difficultés. En outre, le tracé manuel peut être associé à un traitement numérique sur calculateur attelé qui permet — connaissant les coefficients d'absorbance déterminés sur mélanges étalons — de défalquer, c'est-à-dire d'effacer, les effets d'addition sur certaines fréquences en introduisant les mesures spécifiques faites sur d'autres.

C'est peut-être dans ces difficultés que résident les particularités avantageuses de la méthode. La multiplicité des fréquences d'absorption des différents constituants permet plusieurs mesures de la même concentration, démarche qui peut être prolongée par l'utilisation de l'additivité des absorbances. Il y a donc de multiples possibilités et, partant, une grande souplesse dans les mesures. En outre, il existe une garantie très importante, car toutes les mesures étant faites, leur total doit approcher 100 % (tabl. III). Ce contrôle par « bouclage » à 100 % incite à réinterpréter les enregistrements — donc à déceler les erreurs — en cas de trop grands écarts.

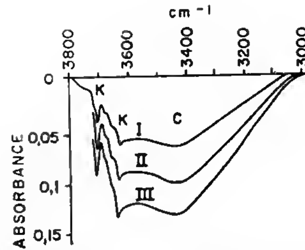


FIG. 14. — Absorbance des complexes silico-ferriques amorphes et variations de leur concentration dans trois faciès types : (I) boue calcaire ; (II) boue carbonatée brune ; (III) boue rouge. La mesure de leur concentration peut valablement s'effectuer à 3 420 cm^{-1} en présence de kaolinite et phillipsite. (D'après FRÖHLICH, 1979.)

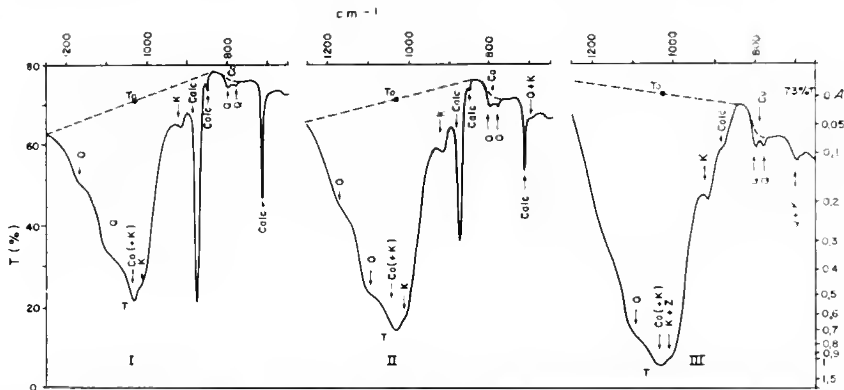


FIG. 15. — Importance relative et détermination des constituants dans les sédiments pélagiques. Mêmes échantillons que sur la figure 14 (entre 650 et 1 250 cm^{-1}). La bande d'absorption Si-O des silicates, centrée sur 1 030 cm^{-1} (ligne de base en tiretés, définissant à 1 030 cm^{-1} une Transmission T_0 = 73 % dans les trois cas) est essentiellement due aux complexes amorphes (environ 6 fois plus abondants que la kaolinite ; comparer avec la figure 14). Noter les fines bandes spécifiques de la calcite et du quartz (ligne de base figurée en tiretés vers 800 cm^{-1}) et la bande d'absorption conjuguée du quartz et de la kaolinite à 700 cm^{-1}. Les concentrations sont rassemblées dans le tableau IV.

I : boue calcaire à complexes amorphes ; II : boue carbonatée brune à complexes amorphes. III : boue rouge à complexes amorphes. Présence de kaolinite et de phillipsite. Co = complexes silico-ferriques amorphes ; Calc = calcite ; K = kaolinite ; Q = quartz ; Z = phillipsite.

(D'après FRÖHLICH, 1979).

Mais la méthode est pour l'instant en défaut lorsque l'on analyse les sédiments détritiques ou à fortes concentrations de silicates et d'aluminosilicates de natures diverses, pour les raisons évoquées ci-dessus (absorbance majeure pour la même fréquence ou pour des fréquences voisines).

Par contre, cette méthode est particulièrement bien adaptée aux sédiments pélagiques profonds à teneurs élevées en substances mal cristallisées. Pour ce type de matériaux, et dans l'état actuel du développement de cette méthode, les erreurs maxima possibles dans la détermination quantitative des espèces minérales majeures sont rassemblées dans le tableau IV.

TABLEAU III. — Résultats de l'analyse de trois faciès types : boue calcaire, boue carbonatée brune et boue rouge, dont les spectres IR sont présentés aux figures 14 et 15. Le « bouclage à 100 % » n'est pas parfait dans le cas des boues rouges, en raison de la présence de phyllite (= 7 %) et d'oxy-hydroxydes (1-2 % ?).

MINÉRAUX	Concentration en %		
	BOUE CALCAIRE (I)	BOUE CARBONATÉE BRUNE (II)	BOUE ROUGE (III)
Calcite	60,4	34,75	traces
« Complexes »	33,5	54,85	73,8
Kaolinite	4,8	7,5	13
Quartz	1,2	2,5	4
Zéolites	—	—	?
Oxydes	—	—	?
TOTAUX	99,9	99,6	90,8

TABLEAU IV (voir texte).

SUBSTANCES	PRÉCISION	OBSERVATIONS
Eau de rétention	± 10 %	
Calcaire	± 2,5 %	
Silice biogène (Diatomées et Radiolaires)	± 15 %	
Quartz	± 5 %	
« Complexes silico-ferriques » ± amorphes	± 15 %	La précision dépend de l'abondance des smectites ferrifères mal cristallisées
Smectites ferrifères mal cristallisées	± 15 %	La précision peut dépendre de l'abondance des « complexes »
Smectites ferrifères et alumineuses bien cristallisées	± 10 %	
Kaolinite	± 5 %	
Montmorillonite	± 10 %	
Palygorskite	± 15 %	La précision dépend de la qualité des substances pures de référence
Zéolites	Indéterminée	Ne peuvent être mesurées qu'à partir d'une teneur > à 5 %
Oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse	A déterminer	
Phosphates	A déterminer	
Matières organiques	A déterminer	

IV. — Conclusions

La spectrométrie d'absorption dans l'infrarouge apparaît donc comme une méthode particulièrement bien adaptée aux dosages du calcaire et des carbonates, des aluminosilicates bien cristallisés ou non, des complexes silico-ferriques « amorphes », de la silice amorphe (biogène) ou cristallisée (quartz), voire des oxy-hydroxydes entrant dans la constitution des sédiments pélagiques et particulièrement dans la composition des sédiments associés aux nodules polymétalliques.

Toutes précautions prises, elle permet des dosages d'une bonne précision, laquelle peut encore être notablement améliorée, pour certaines substances comme la silice biogène, par l'utilisation des dispositifs à double faisceau qu'offrent les appareils modernes. La rapidité des traitements en fait une méthode type pour les analyses en routine.

La spectrométrie d'absorption dans l'infrarouge des sédiments pélagiques est une méthode qui, pour la sédimentologie, la minéralogie quantitative, se place au moins au même niveau d'efficacité que la diffractométrie des rayons X. Il se pourrait que, dans l'avenir, ces deux techniques d'analyses soient systématiquement associées et constituent, jointes à l'observation microscopique, la base de l'analyse sédimentologique.

RÉFÉRENCES CITÉES[1]

Adler, H. H., et P. F. Kerr, 1962. — Infrared study of aragonite and calcite. *Am. Miner.*, **47** : 700-717.

Avram, M., et G. D. Mateescu, 1970. — La spectroscopie infrarouge et ses applications en chimie organique. Dunod éd., Paris : 642 p.

Badia, D., 1974. — Contribution à l'étude minéralogique et géochimique de la kaolinisation, par résilicification, des bauxites du Sud-Est de la France. Application de la spectroscopie infrarouge. Thèse de 3e cycle, Univ. Paris VI : 157 p.

Badia, D., et F. Froehlich, 1975. — Identification de la calcédoine par son spectre infrarouge. *C. r. hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris*, sér. D, **281** : 85-88.

Chester, R., et H. Elderfield, 1967. — The application of infrared absorption spectroscopy to carbonate mineralogy. *Sedimentology*, **9** (1) : 5-21.

Chester, R., et H. Elderfield, 1968. — The infrared determination of opal in siliceous deep-sea sediments. *Geochim. cosmochim. Acta*, **32** : 1128-1140.

Duyckaerts, G., 1959. — The infrared analysis of solid substances. *Analist.*, **84** : 201-214.

Farmer, V. C., 1968. — Infrared spectroscopy in clay minerals studies. *Clay Mineral. Bull.*, **7** : 373-387.

— 1974. — The layer silicate. *In* The infrared spectra of minerals. Mineralogical Soc., Mono no 4, Farmer V. C. Ed., Londres : 331-365.

Flehmig, W., et R. Kurze, 1973. — Die quantitative infrarotspektroskopische phase analyse von mineral mengen. *Neues Jb. Miner. Abh.*, no 1 : 101-102.

Fröhlich, F., 1977. — Les composés silico-ferriques amorphes des sédiments pélagiques néogènes et quaternaires de l'océan Indien austral. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 7e sér., **19** (5) : 1013-1019.

1. Bibliographie non exhaustive.

— 1978. — Silicates authigènes et sédimentation pélagique dans l'océan Indien équatorial. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 7e sér., **20** (4) : 569-578.

— 1979. — Les silicates dans l'environnement pélagique de l'océan Indien au Cénozoïque. Thèse Doct. d'État, Paris VI-Muséum : 305 p.

— 1980. — Néoformation de silicates ferrifères amorphes dans la sédimentation pélagique récente. *Bull. Minéral.*, **103** : 596-599.

Lecomte, J., 1949. — Le rayonnement infrarouge. Gauthier-Villars éd. : 754 p.

Louisfert, J., et T. Pobeguin, 1952. — Différenciation, au moyen des spectres d'absorption infrarouges, du carbonate de calcium. *C. r. hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris*, **235** : 287-289.

Perseil, E. A., 1968. — Contribution à la métallogénie du manganèse dans la France méridionale. Thèse de Doct. d'État, Univ. de Toulouse.

Price, W. J., 1973. — The principles and practice of infrared spectroscopy. Pye Unicam, Cambridge : 63 p.

Ross, S. D., 1974. — Sulphates and other oxy-anions of group VI. *In* The infrared spectra of minerals. Mineralogical Soc., Mono n° 4, Farmer V. C. Ed., Londres : 423-444.

Van der Marel, H. W., 1966. — Quantitative analysis of clay minerals and their admixtures. *Contrib. Miner. Petrol.*, **12** : 96-138.

Van der Marel, H. W., et H. Beutelspacher, 1976. — Atlas of IR spectroscopy of clay minerals and their admixtures. Elsevier.

White, W. B., 1974. — The carbonate minerals. *In* The infrared spectra of minerals. Mineralogical Soc., Mono n° 4, Farmer V. C. Ed., Londres : 227-284.

Bull. Mus. natn. Hist. nat., Paris, 4e sér., **3**, 1981,
section C, no 2 : 183-194.

Les Carnivores du Miocène inférieur des Beilleaux à Savigné-sur-Lathan (Indre-et-Loire)

par Léonard Ginsburg, Jacques Huin et Jean-Pierre Locher *

Résumé. — Dans le gisement des Beilleaux à Savigné-sur-Lathan, la faune des sables continentaux sous-jacents au faluns marins contient *Cynelos helbingi*, ? *C. schlosseri*, *Haplocyonoides mordax*, *Broiliana nobilis*, *Stromeriella franconica*, *Semigenetta elegans* et *Pseudaelurus transitorius*. Son âge est légèrement plus ancien que celui de Wintershof-West, dans le MN 3 de l'échelle biostratigraphique continentale européenne.

Abstract. — The fauna of the continental sands of Les Beilleaux at Savigné-sur-Lathan contains *Cynelos helbingi*, ? *C. schlosseri*, *Haplocyonoides mordax*, *Broiliana nobilis*, *Stromeriella franconica*, *Semigenetta elegans* and *Pseudaelurus transitorius*. Its age is slightly more ancient than Wintershof-West, in the MN 3 of the continental biostratigraphic scale of Europe.

L'extraction du falun dans la carrière de M. Coutard au lieu-dit « Les Beilleaux », sur la commune de Savigné-sur-Lathan (Indre-et-Loire), a permis la mise au jour, sous le dépôt marin, d'un niveau argilo-sableux ayant livré des Mammifères terrestres (Collier et Huin, 1979).

Dans la partie sud de l'exploitation, le falun, d'une épaisseur d'environ trois mètres, appartient à l'unité inférieure telle que l'ont définie Charrier et Palbas (1979). Il est constitué des deux faciès suivants : l'un de type savignéen au sommet, l'autre sableux et conglomératique à la base. Ce dernier repose directement sur le calcaire de la formation d'Anjou attribué classiquement au Ludien.

Au nord, par contre, un niveau argilo-sableux très nettement différencié s'intercale entre calcaire et falun et se substitue progressivement au dépôt marin afin d'être en contact direct avec la terre végétale. Cette disposition s'intègre bien dans la coupe schématique du bassin néogène de Savigné-sur-Lathan proposée par Charrier *et al.* (1980). Le faciès de cette formation varie très rapidement d'un mètre à l'autre ; des argiles, vertes, blanches ou brunes, de diverses épaisseurs s'interposent dans des lits de sables, eux-mêmes de couleur et de granulométrie très variables. Vers la base, parfois sous la nappe phréatique, se situent une ou deux zones de galets de faibles puissances (quelques centimètres). C'est principalement dans ces couches que les restes de Mammifères sont les plus abondants.

* L. Ginsburg, *Institut de Paléontologie du Muséum national d'Histoire naturelle, 8, rue Buffon, 75005 Paris.*
J. Huin, *25, rue Alfred-de-Vigny, 37000 Tours.*
J. P. Locher, *1, rue G. Planté, 37100 Tours.*

Rappelons que le lavage-tamisage d'une très grande quantité de sédiment nous a fourni une microfaune de rongeurs, comportant : *Melissiodon* aff. *dominans*, *Eucricetodon infralactorensis*, *E. quadratum*, *Pseudotheridomys antiquus*, *Eomys* cf. *rhodanicus*, *Peridyromys occitanus*, *P.* cf. *aqualis*, *Paraglis* sp., *Heteroxerus* sp.. Cette faunule, jointe à celle de *Brachyodus onoideus* et des Carnivores étudiés ci-dessous, donne à ce gisement un âge Burdigalien inférieur ou Orléanien inférieur (MN 3 de l'échelle stratigraphique continentale). Dans la numérotation du matériel, le sigle BEI s'applique aux pièces collectées par J. Huin, le sigle BX à celles de la collection J. P. Locher.

SYSTÉMATIQUE

Ordre CARNIVORA Bodwich, 1821

Famille Ursidae Gray, 1825

Sous-famille Amphicyoninae Trouessart, 1885

Genre **CYNELOS** Jourdan, 1861

Cynelos helbingi (Dehm, 1951)

Matériel (mesures en millimètres) : M_1 gauche (BX 500), 19,8 × 9,3. — M_1 gauche (BX 505), 19,25 × 9,3.

Les *Cynelos* sont des Amphicyoninés de petite et moyenne taille, caractérisés principalement par une carnassière inférieure plus étroite et à talonide un peu plus bas que chez le genre *Amphicyon*. Sur la carnassière supérieure, le protocône (ou talon interne) est aussi un peu moins réduit que chez *Amphicyon* et forme un petit bouton détaché du reste de la dent. Nos dents des Beilleaux répondent parfaitement, par leurs dimensions et leur morphologie, à ces caractéristiques.

Le genre comprend deux groupes d'espèces que seule la taille permet de séparer. Les plus anciens *Cynelos* sont connus dans l'Oligocène des Phosphorites du Quercy, avec *Cynelos piveteaui* Ginsburg, de moyenne taille, et *C. crassidens* (Filhol), plus petit. Au début du Miocène inférieur, dans les niveaux MN 1 et 2 de l'échelle biostratigraphique continentale de P. Mein (1975), on connaît *Cynelos lemanensis* (Pomel), de moyenne taille et type du genre, associé au plus petit *C. rugosidens* (Schlosser). Enfin, plus haut, dès la base de la MN 3, c'est-à-dire au tout début de l'Orléanien, Dehm a décrit en 1950, du gisement de Wintershof-West, deux espèces nouvelles qui se sont aussi révélées appartenir au genre *Cynelos* : *Cynelos helbingi*, d'assez forte taille, et *C. schlosseri*, plus petit. On admit unanimement jusqu'en 1977 que les trois grandes espèces étaient reliées phylogénétiquement entre elles, de même que les trois petites entre elles (Ginsburg, 1966). Mais, en 1977, Springhorn,

dans sa révision des Amphicyonidés des Phosphorites du Quercy, contestait ce schéma à son avis trop simple. S'il admet la filiation entre les deux premières petites formes (*C. crassidens* et *C. rugosidens*), il fait éclater sur les pièces du Quercy la lignée de grande taille. Sur une M^1 isolée, déposée à la Faculté des Sciences de Marseille, il crée une sous-espèce nouvelle de *Cynelos lemanensis* qu'il nomme *C. lemanensis quercensis* nov. ssp. Ainsi, dans le Quercy coexisteraient le *C. piveteaui* et le *C. lemanensis*, qui ne pourraient donc dériver l'un de l'autre. D'après la figure de Springhorn (*op. cit.*, fig. 53a, b), la partie interne de la dent est un peu plus longue que chez *C. piveteaui* et un peu plus courte que chez *C. lemanensis*, et le métaconule semble, lui aussi, avoir une importance intermédiaire entre les deux *Cynelos* cités. Nous rétorquerons qu'on ne connaît pas exactement l'âge relatif des différents gisements du Quercy et qu'en conséquence il n'est pas possible d'affirmer que les deux formes sont parfaitement contemporaines. Nous verrons plus volontiers dans le *C. lemanensis quercensis* un intermédiaire entre les deux espèces classiques. Nous admettrons donc qu'il n'y a toujours que deux lignées connues jusqu'à présent dans le genre *Cynelos*.

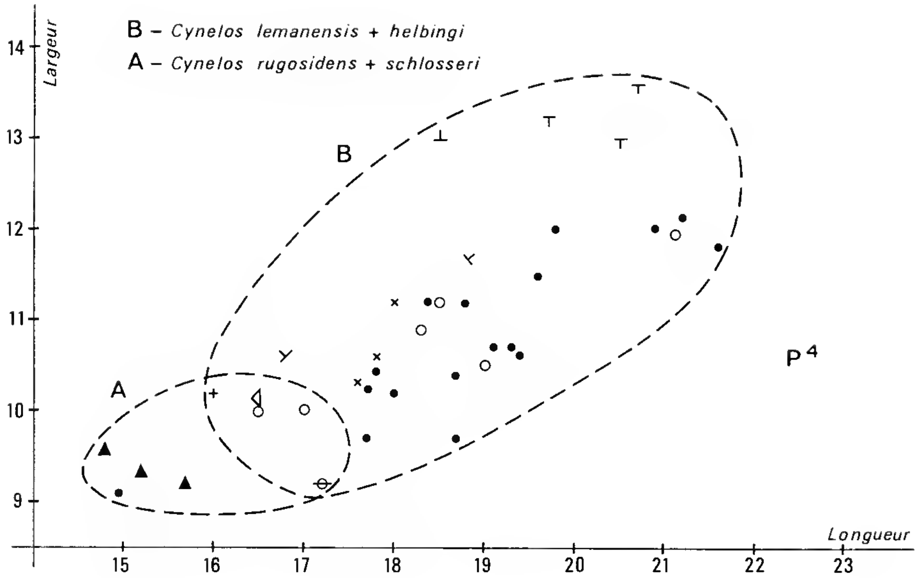
Les deux M_1 de *Cynelos* des Beilleaux, d'après le graphique de points, se trouvent dans l'ellipse de variations des grands *Cynelos* (*lemanensis* et *helbingi*) et non dans celle des petits *rugosidens* et *schlosseri*. Nous attribuerons donc nos deux carnassières inférieures à *Cynelos helbingi*.

Il est à remarquer que trois M_1 de *Cynelos* des faluns, provenant respectivement de Pontigné (Muséum Paris, Fs 420), de Savigné-sur-Lathan et Saint-Michel-sur-Loire, se rangent dans les ellipses de *Cynelos schlosseri* (Fs 420), de *Cynelos helbingi* (M_1 de Savigné), ou des deux (M_1 de Saint-Michel). Les deux dernières sont très proches par la taille de nos deux pièces des Beilleaux. Il est fort probable qu'elles appartiennent à une formation d'âge des Beilleaux et qu'elles sont remaniées dans le sédiment falunien.

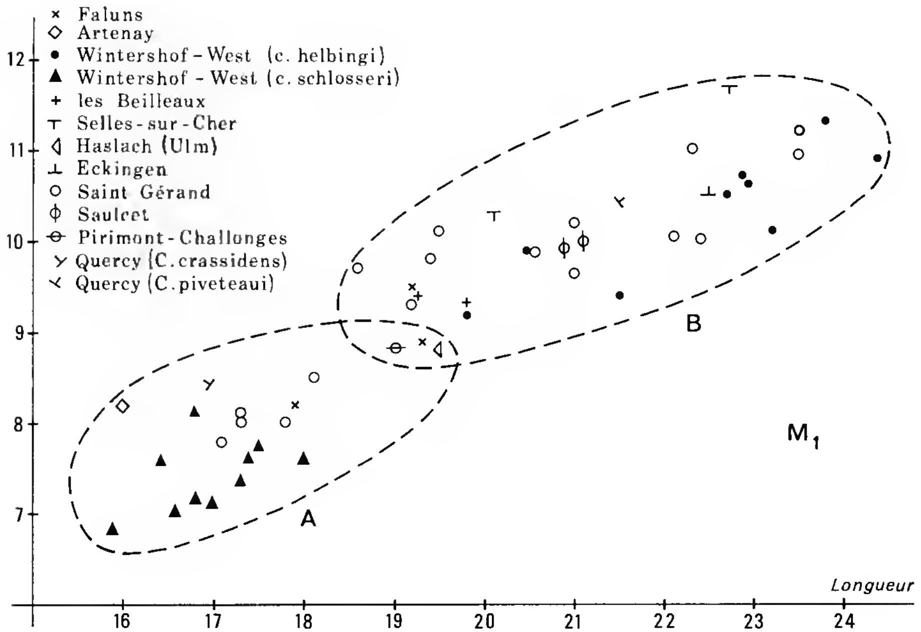
? **Cynelos schlosseri** (Dehm), 1951

Matériel : P^4 gauche (BX 502), 15,9 × 10,2 mm.

Tandis que les M_1 de *Cynelos* des Beilleaux ont les dimensions de celles de *Cynelos helbingi* remanié dans les faluns, la P^4 est d'une taille nettement plus petite que les P^4 remaniées. Aussi, il est difficile de la déterminer comme *Cynelos helbingi*. Comme la M_1 des faluns attribuée à *Cynelos schlosseri* (voir graphique), la P^4 des Beilleaux est proche mais un peu plus grande que les échantillons correspondant du *Cynelos schlosseri* de Wintershof-West. Or, l'évolution de *Cynelos rugosidens* à *Cynelos schlosseri* consiste principalement en une réduction de taille. Notre P^4 montrant une longueur intermédiaire entre les deux espèces, il paraît logique de la considérer comme appartenant à *C. schlosseri*. Mais, dans ce cas, le gisement des Beilleaux serait un peu plus ancien que celui de Wintershof-West.



B – Cynelos lemanensis + helbingi
A – Cynelos rugosidens + schlosseri
Largeur
Longueur
B
A
P4



× Faluns
◇ Artenay
• Wintershof-West (c. helbingi)
▲ Wintershof - West (c. schlosseri)
+ les Beilleaux
Selles-sur-Cher
Haslach (Ulm)
Eckingen
○ Saint Gérand
Saulcet
Pirimont-Challonges
Quercy (C. crassidens)
Quercy (C. piveteaui)
Longueur
B
A
M1

Sous-famille DAPHOENINAE Hough, 1948

Tribu Haploeyonini Ginsburg, 1966

Haplocyonoides mordax Hurzeler, 1940

MATÉRIEL (mesures en millimètres) : M^2 droite (BEI 392), 12,8 × 18,7. — P_4 gauche (BEI 393), 16,7 × 7,05.

Les Haplocyonini forment, à l'intérieur des Daphoeninés, un petit groupe caractérisé par des prémolaires hautes et piquantes, une carnassière inférieure à talonide haut, protoconide pointu comme les prémolaires, suivi d'un talonide tranchant à partie interne (entoconide) très réduite ; la seconde tuberculeuse voit aussi toute sa moitié linguale (métaconide et entoconide) réduite ; la carnassière supérieure possède un talon interne (protocône) bien développé tandis que les molaires supérieures sont très larges, déprimées dans leur région centrale et sont peu dissymétriques par rapport à un axe transversal. Trois genres sont unanimement reconnus dans cette tribu : *Haplocyon* Schlosser, 1901, *Haplocyonoides* Hurzeler, 1940, et *Haplocyonopsis* de Bonis, 1973. Il nous semble que l'on puisse facilement rattacher au même groupe le genre *Sarcocyon* Ginsburg, 1966.

La M^2 BEI 392 des Beilleaux est proche de celle d'*Haplocyonopsis crassidens* de Paulhiac figurée par DE BONIS (*op. cit.*, pl. VI, fig. 1). Comme celle-ci, elle est peu dissymétrique par rapport à un axe transversal, le protocône est équidistant du bord antérieur et du bord postérieur, il est formé d'une pointe bien isolée à peine prolongée à l'arrière et surtout à l'avant par une petite crête, le cingulum labial est important, le cingulum lingual est épais et ceinture bien, en demi-cercle, le protocône. La M^2 d'*Haplocyon* est beaucoup plus réduite ; son protocône est plus central (ou déplacé labialement), son métacône plus réduit. Celle de *Sarcocyon* est aussi bien différente, avec un métacône trop réduit, un protocône plus bas, étalé, et un cingulum lingual moins large. On ne connaît pas la M^2 d'*Haplocyonoides*, mais la ressemblance des autres dents avec le genre *Haplocyon* laisse à priori entrevoir pour M^2 une même proximité morphologique. Cependant, DE BONIS a figuré (*op. cit.*, pl. IV fig. 5), de Laugnac, un fragment de maxillaire avec P^4-M^1 qui est un peu différent du type de l'espèce et qu'il désigne prudemment sous le vocable de ?*Haplocyonoides mordax*. Par rapport au type de l'espèce, la M^1 de ce maxillaire de Laugnac est beaucoup moins étranglée au niveau de la fosse centrale, le protocône est moins ponctiforme, le cingulum lingual est moins régulier, avec un net soulèvement à l'angle postéro-interne. Cette première tuberculeuse se distingue de celle d'*Haplocyonopsis crassidens* par ses tubercules externes un peu plus aigus, son protocône moins développé et son cingulum lingual peut-être un peu moins épais, au bord postérieur soulevé en lame. Ces caractères sont à peu de chose près ceux qui distinguent la M^2 des Beilleaux de celle d'*Haplocyonopsis crassidens*. Aussi sommes-nous fortement tentés de rapprocher la pièce des Beilleaux de celle de Laugnac.

L'examen de la P_4 des Beilleaux n'infirme pas les vues précédentes. Cette dent forte, haute, appartient bien à un Haplocyonini. Elle ressemble un peu à celle d'*Haplocyonopsis crassidens* mais est beaucoup plus couchée en arrière, étroite, plus basse, et son deutéroconide est plus réduit. Celle d'*Haplocyon crucians* figurée par VIRET (1929, pl. VIII, fig. 2) lui est

plus proche. Même étroitesse, même pointe aiguë, même deutérocônide mince et déplacé labialement, même cingulum postérieur. Elle en diffère, cependant, par son profil latéral qui montre une pointe principale plus couchée vers l'arrière, et une plus grande importance de la région postérieure. Comme *Haplocyon* est plus proche d'*Haplocyonoides* que d'*Haplocyonopsis*, on peut raisonnablement incliner à attribuer notre P_4 des Beilleaux à *Haplocyonoides mordax*, comme la M^2 et comme la pièce de Laugnac.

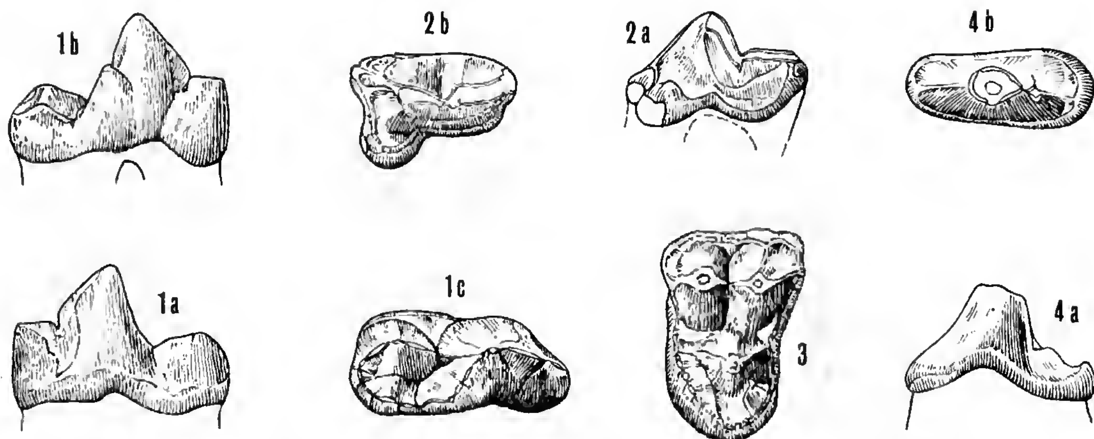


Fig. 1-4. — Ursidae. 1 et 2, *Cynelos* : 1, *Cynelos helbingi* (BX 505), M_1 gauche : a, face externe, b, face interne, c, face occlusale (× 1,5) ; 2, ?*Cynelos schlosseri* (BX 502), P^4 gauche : a, face interne, b, face occlusale (× 1,5). — 3 et 4, *Haplocyonoides mordax* : 3, M^2 droite (BEI 392), face occlusale (× 1,5) ; 4, P_4 gauche (BEI 393) : a, face externe, b, face occlusale (× 1,5).

La découverte dans les faluns (à l'état sans doute remanié) de plusieurs M_1 identiques à celles du type d'*Haplocyonoides mordax*, ainsi que d'une M^1 étranglée, bien différente de celle d'*Haplocyonopsis crassidens* et rappelant à la fois celles d'*H. mordax* et du maxillaire de Laugnac, semble confirmer notre détermination.

Famille Mustelidae Swainson, 1835

Sous-famille Broilianinae de Beaumont, 1964

Longtemps considérés comme des Mustélidés, les genres *Broiliana* et *Stromeriella* ont été placés en 1968 par de Beaumont dans la famille des Procyonidés, sur la base des caractères de la région auditive. Les dentures montrent aussi des caractères qui paraissent renforcer cette opinion. Mais, en 1976, le même auteur a montré que le groupe est uniquement européen et dériverait d'un *Amphictis* et, au-delà, d'un *Plesictis*. Il faut donc en faire un sous-groupe des Mustelidae.

Genre **BROILIANA** Dehm, 1950

Broiliana nobilis Dehm, 1950

Matériel : M_1 droite (BEI 111), 6,7 × 3,3 mm.

La petite carnassière inférieure des Beilleaux offre tous les caractères des *Broiliana* : proportions générales, trigonide simple dont les trois pointes sont formées par des petites pyramides aux arêtes très nettes, métaconide de même hauteur que le paraconide, talonide court sans vrai sillon talonidien central mais formé d'une fosse centro-antérieure bordée, comme un cratère, par une ligne de crêtes : hypoconide, hypoconulide, entoconulide et entoconide. Elle diffère des deux formes déjà connues (*Broiliana nobilis*, de Wintershof-West, et *Broiliana dehmi* de Beaumont et Mein, 1973, de Serre de Verges) par son protoconide légèrement mais nettement plus élevé, ainsi qu'un talonide un peu plus court. De plus, si la longueur entoconide + entoconulide est la même, le premier élément est réduit en longueur au profit du second.

Sur certaines pièces de *Broiliana nobilis*, le protoconide peut cependant être assez haut, comme sur celle de la figure 183 de Dehm (*op. cit.*) ; le talonide de la même espèce peut aussi être de longueur un peu variable, et parfois assez court. Ces différences sont toutes de faible importance.

Il nous paraît nettement que *Broiliana nobilis* et *Broiliana dehmi* sont beaucoup plus proches entre elles que de notre forme angevine. La longueur de cette dernière (L = 6,7 mm) est inférieure à la plus petite M_1 de *Broiliana nobilis* (L = 6,9 mm) mais supérieure à celle de Serre de Verges (L = 6,4 mm). Nous sommes donc tentés de rassembler dans la même espèce les formes des Beilleaux, des Wintershof-West et de Serre de Verges. Pour la forme de ce dernier gisement, de Beaumont et Mein ont hésité à créer une espèce ou une sous-espèce nouvelle. Il nous semble qu'il ne devrait s'agir que d'une sous-espèce, justifiée principalement par la réduction en longueur de la M_2. D'ailleurs, de Beaumont, en 1976, est arrivé à la même conclusion. Aux Beilleaux, la pauvreté du matériel ne nous engage pas à créer une nouvelle subdivision.

Genre **STROMERIELLA** Dehm, 1950

Stromeriella franconica Dehm, 1950

Matériel : P^4 droite (BEI 303), 8,6 × 6,25 mm.

Comme *Broiliana nobilis*, *Stromeriella franconica* est indissolublement lié au gisement de Wintershof-West dont il est un des éléments les plus originaux. Plus grand que *Broiliana nobilis*, il y est aussi plus fréquent. Le protocône de la carnassière supérieure chez *Broiliana nobilis* est en général plus ramassé sur lui-même mais toujours marqué par un petit cône,

tandis que celui de *Stromeriella franconica* est formé d'une sorte de bourrelet large dont le bord peut seulement s'exagérer en une petite pointe à son bord extrême lingual.

La dent des Beilleaux répond parfaitement bien à cette dernière définition morphologique. Dimensionnellement, elle se situe aussi dans le diagramme des points de la P^4 de *Stromeriella franconica*.

REMARQUES

Stromeriella franconica et *Broiliana nobilis* ont été longtemps considérés comme des migrants d'âge Orléanien inférieur (MN 3). En fait, comme l'a montré DE BEAUMONT (1976), la denture inférieure de *Stromeriella franconica* est très proche de celles d'*Amphictis antiquus* Gervais, de Saint Gérand-le-Puy, et d'*Amphictis aginensis* de Bonis, de Laugnac. Elle n'en diffère que par quelques minces détails de la carnassière : le trigonide est plus bas et le talonide plus allongé et plus ouvert à l'arrière chez *Stromeriella franconica*. De plus, souligne DE BEAUMONT, la pièce découverte à Espira de Conflent, et décrite par BAUDELOT et CROUZEL (1974) sous le nom de *Broiliana nobilis confluensis*, appartient plutôt au genre *Stromeriella* et se montre morphologiquement intermédiaire entre *Amphictis aginensis* et *Stromeriella franconica*. Ainsi, se dessine une « liaison évolutive », selon le mot de DE BEAUMONT, entre les pièces de Laugnac, Espira du Conflent et Wintershof-West. Sur la dentition supérieure le phénomène est plus difficile à suivre car on ne connaît pas les dents maxillaires, ni chez *Amphictis aginensis*, ni chez *Stromeriella franconica confluensis*, et on ne connaît que deux exemplaires de celles d'*Amphictis antiquus* (VIRET, 1929, pl. XIV, fig. 16 et 17). Ces deux dernières pièces ne paraissent pas, d'ailleurs, appartenir à la même espèce animale. La P^4 de la figure 16, avec son protocône très ponctiforme, se rapproche plus de celle de *Broiliana*. Mais la carnassière de la figure 17 est plus nettement du type *Stromeriella*, avec un protocône étalé longitudinalement et transversalement. La M^1 de la figure 17 peut aussi facilement préfigurer celle de *Stromeriella*. Ce dernier s'enracine donc bien dans le genre *Amphictis*, dont les plus anciens représentants datent des Phosphorites du Quercy, avec *Amphictis ambiguus* Gervais.

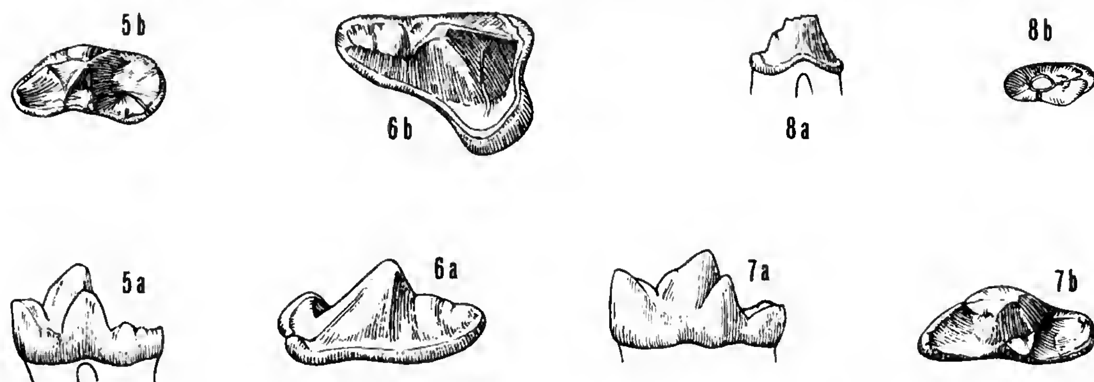


FIG. 5-7. — Mustelidae et Feloidea. 5 et 6, Mustelidae : 5, *Broiliana nobilis*, M_1 droite (BEI 111) : a, face interne, b, face occlusale (× 3) ; 6, *Stromeriella franconica*, P^4 droite (BEI 303) : a, face externe, b, face occlusale (× 3). — 7 et 8, Feloidea : 7, *Semigenetta elegans*, M_1 droite (BEI 264) : a, face interne, b, face occlusale (× 3) ; 8, *Pseudaelurus transitorius*, P^3 gauche (BEI 263) : a, face externe, b, face occlusale (× 1,5).

Les genres *Amphictis*, *Stromeriella*, *Broiliana*, *Alopecocyon*, *Simocyon* forment entre eux une unité homogène ainsi que l'a montré DE BEAUMONT. Il est difficile d'enraciner tout ce lot dans les Procyonidés et il est plus plausible qu'il représente une radiation originale des Mustélidés européens. Nous les rangerons donc dans leur sous-famille indépendante, celle des Broilianinae, justement créée à cet effet par notre confrère de Genève.

Famille VIVERRIDAE Gray, 1821

Sous-famille VIVERRINAE Gill, 1872

Genre **SEMIGENETTA** Helbing, 1927

Semigenetta elegans Dehm, 1950

MATÉRIEL : M_1 droite (BEI 264), 7,6 × 3,5 mm.

Le genre *Semigenetta* a été créé par HELBING, en 1927, pour la *Semigenetta repelini* du « Burdigalien » de Captieux. A ce genre doit être rattachée la *Semigenetta* de Sansan et de La Grive, nommée originellement *Viverra sansaniensis* à Sansan par LARTET, en 1851, et *Plesictis mutatus* à La Grive par FILHOL, en 1883. En 1891, dans sa révision des Mammifères de Sansan, FILHOL conserve le nom donné par LARTET, sans faire le moindre rapprochement avec la pièce de La Grive. VIRET (1951) a établi l'homologie entre les deux formes, et proposé de les ranger dans le genre *Semigenetta*, avec comme nom d'espèce *mutata*. Il arguait, pour rejeter le nom donné par LARTET, que la diagnose de LARTET lui paraissait trop insuffisante. GINSBURG (1961) l'a suivi sur ce point, mais HEIZMANN, en 1973, reprend le nom d'espèce donné par LARTET. Nous ne pouvons que donner raison à ce dernier auteur car, d'une part, la diagnose de LARTET est parfaitement suffisante pour distinguer ce Viverridé dans la faune de Sansan et, d'autre part, parce que l'amendement d'une diagnose n'impose pas une translation taxonomique. Le Viverrinae de Sansan et de La Grive doit donc se nommer *Semigenetta sansaniensis*.

HEIZMANN a aussi montré, à l'aide d'un diagramme suggestif (*op. cit.*, fig. 22) que les trois formes connues de *Semigenetta* peuvent être considérées, d'après les dimensions de la M_1, comme liées phylogénétiquement. La plus petite est la *Semigenetta elegans*, de Wintershof-West, Solnhofen et Estrepouy, suivie de *Semigenetta* aff. *sansaniensis* (que l'on pourrait aussi nommer *Semigenetta repelini*), de Vieux-Collonges, Pontlevoy, enfin, de *Semigenetta sansaniensis*, de Sansan, La Grive, Steinheim et Anwil.

Comme l'a écrit HELBING, la caractéristique de *Semigenetta* est, outre son haut trigonide et son talonide réduit, la structure de ce dernier, formé par un hypoconide et « une crête arquée qui entoure du côté interne la dépression étroite du talon ». Ces caractéristiques sont exactement celles de la petite carnassière des Beilleaux, dont les dimensions cadrent parfaitement aussi avec celles de la forme contemporaine (ou subcontemporaine) de Wintershof-West, dont les dimensions extrêmes sont : 7,4 × 3,5 ; 7,6 × 3,4 et 8,8 × 4,3 mm.

Famille FELIDAE Gray, 1821

Sous-famille FELINAE Trouessart, 1885

Genre **PSEUDAELURUS** Gervais, 1850

Pseudaelurus transitorius Depéret, 1892

MATÉRIEL : P^3 gauche (BEI 263), 8,0 × 3,6 mm.

Les *Pseudaelurus* sont les félins du Miocène les plus proches des formes actuelles. On reconnaît traditionnellement trois espèces, de taille progressivement croissantes : *Ps. transitorius* Depéret (= *Ps. turnauensis* (Hoernes), *Ps. lorteti* Gaillard et *Ps. quadridentatus* (Blainville). Récemment, E. HEIZMANN (1973) a élevé au rang d'espèce le *Ps. quadridentatus romieviensis* Roman et Viret, de La Romieu, forme intermédiaire par la taille entre *Ps. lorteti* et *Ps. quadridentatus* typique. Le *Pseudaelurus quadridentatus*, aux canines supérieures un peu plus longues et fines que celles des félins actuels, semble bien être à la racine du *Metailurus* du Miocène supérieur (VIRET, 1951), tandis que *Ps. lorteti*, aux canines supérieures plus courtes, se place bien dans l'ascendance de *Felis* (VIRET, 1951 ; DE BEAUMONT, 1961, 1964). Pour cette raison, VIRET a élevé *Ps. lorteti* au rang de sous-genre différent, *Schizailurus*, que DE BEAUMONT va jusqu'à considérer comme un genre. Ceci est une question délicate et peut-être accessoire, l'important étant que tous les auteurs qui se sont penchés récemment sur la question admettent les filiations énoncées ci-dessus.

La petite prémolaire des Beilleaux, avec la pointe principale suivie d'un deutérocône et d'un cingulum, sa crête antérieure très déjetée du côté lingual et l'épaississement de sa couronne au niveau de l'angle antéro-lingual de sa racine postérieure, est une P^3 de Feloidea. Elle se distingue de celle des Viverridés (tel *Semigenetta*) et des Hyaenidés (tel *Protictitherium*) par l'importance de son deutérocône. Elle est très proche, à la taille près, de celles de *Pseudaelurus quadridentatus* et de *Ps. lorteti*. Celle de *Ps. transitorius*, de Wintershof-West, lui est presque superposable. Elle est seulement très légèrement plus épaisse et un peu plus courte (7,7 × 3,8 mm contre 8,0 × 3,6 mm aux Beilleaux). Ces différences nous paraissent négligeables au vu de celles signalées par DEHM (1950) sur les dents inférieures (beaucoup plus nombreuses) du *Ps. transitorius* de Wintershof-West.

CONCLUSION

La liste des Carnivores des Beilleaux est finalement la suivante :

Cynelos helbingi (Dehm)
?*Cynelos schlosseri* (Dehm)
Haplocyonoides mordax Hurzeler

Broiliana nobilis Dehm
Stromeriella franconica Dehm
Semigenetta elegans Dehm
Pseudaelurus transitorius Depéret

Parmi ces formes, *Broiliana nobilis*, *Stromeriella franconica*, *Semigenetta elegans* et peut-être *Cynelos helbingi* sont caractéristiques de la zone MN 3, dont le gisement de référence est Wintershof-West, où elles ont justement été établies. *Cynelos schlosseri* s'y trouve aussi, mais peut monter plus haut dans l'échelle stratigraphique (jusque dans la MN 4, à Artenay). Il en est de même pour *Pseudaelurus transitorius*, qui monte beaucoup plus haut puisqu'on le retrouve jusqu'au sommet du Miocène moyen (à La Grive Saint-Alban). Par contre, *Haplocyonoides mordax* a été décrit sur des pièces de l' « Aquitanien » (Hurzeler, 1940) et n'a pas été retrouvé plus haut que Laugnac. Son absence à Wintershof-West, où les carnivores sont particulièrement abondants, semble caractéristique. Sa présence aux Beilleaux suggère donc pour ce gisement un âge plus ancien que Wintershof-West. Or, on a vu, à propos des *Cynelos*, que la détermination de la P^4 des Beilleaux comme *Cynelos schlosseri* convient mieux que son attribution à *Cynelos helbingi*, mais impliquerait dans ce cas un âge plus ancien des Beilleaux par rapport à Wintershof-West. Si l'on ajoute que nos dents isolées de *Cynelos helbingi*, *Broiliana nobilis* et *Semigenetta elegans* se trouvent toutes, dimensionnellement, dans les lots des plus petits individus des populations correspondantes de Wintershof-West, on est bien amené à la conclusion que le gisement angevin est très légèrement plus ancien que celui de Wintershof-West.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Baudelot, S., & F. Crouzel, 1974. — La faune burdigalienne des gisements d'Espira-du-Confluent (Pyrénées Orientales). *Bull. Soc. Hist. nat., Toulouse*, **110** (3-4) : 311-326.

Beaumont, G. de, 1961*a*. — Nouveaux restes de Daphoenidae Hough (Carnivora) de l'Oligocène européen. *Eclog. geol. Helv.*, Basel, **54** (2) : 546-551.

— 1961*b*. — Recherches sur *Felis attica* Wagner du Pontien eurasiatique avec quelques observations sur les genres *Pseudaelurus* Gervais et *Proailurus* Filhol. *Nouv. Archs Mus. Hist. nat., Lyon*, **6** : 17-45.

— 1964. — Essai sur la position taxonomique des genres *Alopecocyon* Viret et *Simocyon* Wagner (Carnivora). *Eclog. geol. Helv.*, Basel, **57** (2) : 829-836.

— 1964. — Remarques sur la classification des Felidae. *Eclog. geol. Helv.*, Basel, **57** (2) : 837-845.

— 1968. — Note sur la région auditive de quelques carnivores. *Archs Sci., Genève*, **21** (2) : 213-223.

Beaumont, G. de, & P. Mein, 1973. — Découverte du genre *Broiliana* Dehm (*B. dehmi* n. sp.) Procyonidae, Carnivora, dans le Burdigalien inférieur de Serre de Verges, Pyrénées-orientales. *Archs Sci. Genève*, **26** (1) : 93-102.

Beaumont, G. de, 1976. — Remarques préliminaires sur le genre *Amphictis* Pomel (Carnivora). *Bull. Soc. vaud. Sci. nat.*, nº 350, 73 : 171-180.

Bonis, L. de, 1973. — Contribution à l'étude des Mammifères de l'Aquitanien de l'Agenais. Rongeurs-Carnivores-Périssodactyles. *Mém. Mus. natn. Hist. nat., Paris*, sér. C, **28** : 1-192.

Charrier, P., & N. Palbas, 1979. — Un modèle d'évolution paléoécologique et de dynamique sédimentaire dans les faluns miocènes de Touraine : le Bassin de Savigné-sur-Lathan (I.-et-L.). Tome 1 : Étude paléontologique. Thèse, Univ. Paris-Sud : 1-205.

Charrier, P., G. Charbonnel, J. J. Chateauneuf, D. Gardette, J. P. Margerel, J. Riveline, & M. Roux, 1980. — Découverte dans le bassin de Savigné-sur-Lathan (Indre-et-Loire) d'une microfaune et d'une microflore du Miocène inférieur correspondant aux premiers niveaux transgressifs de la mer des Faluns de Touraine. *C. r. hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris*, D, **290** : 1325-1328.

Collier, A., & J. Huin, 1979. — Découverte d'un gisement d'âge burdigalien inférieur dans des sables sous-jacents aux Faluns de Touraine. Étude de la faune de rongeurs et intérêt biostratigraphique. *C. r. hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris*, D, **289** : 249-252.

Dehm, R., 1950. — Die Raubtiere aus dem Mittelmiocän (Burdigalium) von Wintershof-West bei Eichstät in Bayern. *Abh. bayer. Akad. Wiss.*, math.-nat. Kl., N.F., München, **58** : 1-141.

Filhol, M. H., 1980. — Étude sur les mammifères fossiles de Sansan. *Bibl. École Hautes Études*, sect. Sci. nat., Paris, **37** (1) : 1-319.

Ginsburg, L., 1961. — La faune des Carnivores miocènes de Sansan (Gers). *Mém. Mus. natn. Hist. nat., Paris*, N. S. C, **9** : 1-190.

— 1966. — Les Amphicyons des Phosphorites du Quercy. *Annls Paléont., Vert.*, Paris, **52** : 23-64.

Heizmann, E. P. J., 1973. — Die Carnivoren des Steinheimer Beckens. B. Ursidae, Felidae, Viverridae sowie Ergänzungen und Nachträge zu den Mustelidae. *Palaeontographica*, Stuttgart, suppl. 8 : 1-95.

Helbing, H., 1927. — Une genette fossile trouvée dans les argiles de Captieux (Gironde). *Verh. naturf. Ges. Basel*, **38** : 305-315.

Hurzeler, J., 1940. — *Haplocyonoides* nov. gen., ein aberranter Canide aus dem Aquitanien des Hesslers (Mainzer Becken). *Eclog. geol. Helvet.*, Basel, **33** (2) : 224-229.

Kuss, S. E., 1965. — Revision der europäischen Amphicyoninae (Canidae, Carnivora, Mamm.) ausschliesslich der voroberstampischen Formen. *Sber. heidelb. Akad. Wiss.*, math.-nat. Kl. : 1-168.

Mein, P., 1975. — Biozonation du Néogène méditerranéen à partir des Mammifères. Rep. on Activity R.C.M.N.S. Working Group (1971-1974), V^e congr. intern. Néogène méditerranéen, Bratislava, 78-81.

Springhorn, R., 1977. — Revision der Alttertiären europäischen Amphicyonidae (Carnivora, Mammalia). *Palaeontographica*, Stuttgart, Abt A, **158** (1-3) : 26-113.

Viret, J., 1929*a*. — *Tomocyon grivensis* nov. gen. n. sp. et les Canidés de La Grive Saint-Alban (Isère). *Bull. Soc. géol. Fr.*, Paris, 4e sér., **29** : 217-226.

— 1929*b*. — Les faunes de Mammifères de l'Oligocène supérieur de la Limagne bourbonnaise. *Annls Univ. Lyon*, N.S., **47** : 1-328.

— 1951. Catalogue raisonné de la faune des mammifères miocènes de La Grive-Saint-Alban (Isère). I : Chiroptères, Carnivores, Édentés pholidotes. *Nouv. Archs Mus. Hist. nat., Lyon*, **3** : 1-102.

Bull. Mus. natn. Hist. nat., Paris, 4e sér., **3**, 1981,
section C, nº 2 : 195-204.

Traits essentiels de l'évolution des faunes de Mammifères néogènes de la région mer Noire-Caspienne

par Léo Gabunia *

Résumé. — L'étude des Mammifères néogènes se rapportant, dans la région mer Noire-Caspienne, à des niveaux stratigraphiques bien établis, permet d'esquisser les étapes essentielles de l'évolution de ces faunes et d'éclairer leurs rapports probables avec celles des époques correspondantes du Néogène de la province Méditerranéenne. Plusieurs traits propres aux faunes néogènes de la région mer Noire-Caspienne ainsi que la présence d'éléments visiblement asiatiques dans ces faunes prouvent leur indépendance biogéographique certaine.

Grâce aux travaux remarquables de N. Andrussov, V. Kolesnikov, L. Davitashvili, A. Eberzin, B. Zhizhchenko et autres, nous possédons une base paléontologique solide pour une subdivision très fine des formations tertiaires supérieures de la province mer Noire-Caspienne. C'est pourquoi, l'étude des différents complexes de Mammifères néogènes de cette région, se rapportant à des niveaux stratigraphiques strictement déterminés, permettent d'établir le remplacement successif des faunes, parfois même dans les limites d'un seul étage. Connaissant ces faunes bien datées, nous pouvons ensuite procéder à la corrélation des formations néogènes continentales non seulement dans la vaste province mer Noire-Caspienne, mais aussi sur le territoire des régions voisines. L'accomplissement de ce grand et important travail verra le jour dans un avenir proche, mais déjà les faits accumulés au cours de ces derniers temps, concernant l'âge géologique des divers gisements des faunes de Mammifères néogènes du sud de la partie européenne de URSS et d'une série d'autres points, exposés dans ce rapport, permettent d'esquisser les étapes essentielles de l'évolution de ces faunes et de préciser quelque peu le schéma actuel de corrélations des subdivisions correspondantes du Néogène d'Europe.

La période la plus ancienne de l'histoire des Mammifères néogènes de la région mer Noire-Caspienne est fort peu connue. La faune mammalienne de l' « Aquitanien », ou Caucasien (l'Agénien de l'échelle continentale), dont le gisement le plus important est connu dans les couches à *Corbula* (série d'Aral) d'Aguispé, ne diffère de celle de l'Oligocène moyen que par un appauvrissement et un renouvellement peu considérable. Elle contient : *Palaeoscaptor acridens*, *Desmatolagus* aff. *gobiensis*, *Palaeocastor* sp., *Steneofiber* sp., *Eucricetodon* aff. *deploratus*, *Argiromys aralensis*, *A. woodi*, *Aralomys gigas*, *Tachyoryctoides obrutschevi*, *Eumisodon spurius*, *E. orlovi*, *Agispelagus simplex*, *Protalactaga borissiaki*, *Paraceratherium prochorovi*, *Aprotodon borissiaki*, *Aceratherium aralense*, *Lophiomeryx* sp., *Prodremotherium* sp., *Miomeryx* sp. (Beliajeva, 1948, 1954 ; Borissiak, 1954 ; Bendukidze, 1977).

* *Institut de Paléobiologie, Tbilissi, URSS.*

Le complexe d'Aguispé semble être répandu largement dans la région Aralo-Caspienne ce qui est confirmé par les trouvailles de ses éléments caractéristiques dans les couches à *Nodularia akbaurensis* (Bajgubek supérieur) de Kuzhasaï et les couches à *Corbula helmerseni* d'Ustjurt. Les affinités de ce complexe avec ceux de l'Oligocène du Kazakhstan central et de Mongolie sont évidentes, mais la spécialisation de l'Indricotheriidae d'Aguispé poussée assez loin dans le sens d'une adaptation à un milieu plus ou moins sec et l'évolution plus marquée de quelques autres représentants de cette faune indiquent un âge plus récent que celui des complexes asiatiques typiques de l'Oligocène moyen et supérieur. Cela est confirmé aussi par sa position stratigraphique : l'appartenance à la série saumâtre d'Aral, attribuée au début du Miocène. Il est d'ailleurs connu que la faune de gros Mammifères de l'Aquitanien de l'Europe occidentale est aussi étroitement liée à celle du Stampien. Cette succession est plus marquée dans la province mer Noire-Caspienne et les régions asiatiques où les éléments stampiens semblent avoir une durée plus prolongée qu'en Europe occidentale (Gabunia, 1964).

La plus ancienne faune à *Gomphotherium*, *Zygolophodon* et Cervidés archaïques succède dans la région mer Noire-Caspienne à la faune aux Indricotheriidés tardifs. Son appartenance au Miocène inférieur (l'étage Sakaraulien) est surtout évident à Bishtubia (Ustjurt), où elle est incluse dans les sables argileux surmontés par les couches à *Rzehakia socialis*.

Les sables à *Rzehakia* (l'étage Kozakhurien), eux-mêmes, ont livré une faunule comprenant des Ursidés, Mustélidés, *Gomphotherium* sp., *Dicerorhinus* sp., *Lagomeryx* sp., *Stephanocemas aralensis*, *Amphitragulus* sp. (Lavrov *et al.*, 1978).

Il faut donc admettre qu'à l'époque qui précéda l'arrivée par migration des Proboscidiens et, sans doute, de l'Équidé *Anchitherium*, dont les restes fossiles ont été récoltés dans le Miocène inférieur (l' « horizont d'Aral ») de la région voisine d'Aral (Kazakhstan central), la faune aux derniers Indricotheriidés était encore largement répandue dans la province mer Noire-Caspienne. Nous ne connaissons, cependant, à peu près rien de la faune qui devrait correspondre par son stade évolutif à un âge tout à fait intermédiaire entre Aguispé et Bishtubia. Un *Gomphotherium* aff. *cooperi* de la série rubescente de Transcaucasie (Gabrielian, Gabunia, 1959) et un petit *Amphicyon* de l'Ukraine (Pavlow, 1902) pourraient peut-être appartenir à ce niveau de passage. Il est difficile de désigner en Europe occidentale un équivalent plus ou moins exact du complexe d'Aguispé, mais on peut supposer, d'après une certaine analogie des tendances générales d'évolution de la faune mammalienne, que c'est plutôt le niveau de Paulhiac qui lui correspond. En ce qui concerne les faunules du Sakaraulien et du Kozakhurien, elle peuvent être parallélisées respectivement avec les unités mammaliennes NM 3 (Wintershof-West) et NM 4a (Artenay).

Faisant suite stratigraphiquement aux sables à *Rzehakia socialis*, les argiles verdâtres à *Crassostrea gryphoides* (l'étage Tarkhanien) de la région Aralo-Caspienne renferment la petite faune de Kzylbulak qui contient des formes suivantes : *Cricetodon* sp., Mustelidae indét., *Zygolophodon* sp., *Anchitherium aurelianense*, *Aceratherium* sp., *Conohyus* sp., *Micromeryx* sp., *Dicrocerus aralensis*, *Stephanocemas* sp. (Biriukov, Voskoboynikov, Savinov, 1968 ; Bendukidze, 1976). La première apparition de *Cricetodon*, *Dicrocerus* et de *Micromeryx* est apparemment un trait caractéristique du Tarkhanien, attribué dans la province mer Noire-Caspienne à la base du Miocène moyen. Cette faune peut être mise en équivalence avec celle de Baigneaux (NM 4b) ou de Pontlevoy (NM 5) de l'Europe occidentale.

Avec le Tshokrakien débute le complexe à *Platybelodon*, dont le gisement le plus connu est celui de Belometshetskaja (Caucase du Nord), offrant l'avantage de posséder une riche faune de Mollusques du Tshokrakien plutôt moyen et de Mammifères terrestres. Ce complexe de Mammifères renferme *Palaeocricetus caucasicus*, *Democricetodon* sp., *Peridyromys* sp., *Plesiosminthus* sp., *Gomphotherium* aff. *angustidens*, *Platybelodon danovi*, *Amphicyon caucasicus*, *Laphyctis* sp., *Pseudaelurus* sp., *Percrocuta abessalomi*, *Chalicotherium* sp., *Paranchitherium karpinskii*, *Beliajevina caucasica*, *Aceratherium* sp., *Chilotherium* sp., *Caucasotherium efremovi*, *Bunolistriodon* cf. *lockharti*, *Kubanochoerus robustus*, *Dorcatherium* sp., *Lagomeryx* sp., *Micromeryx* sp., *Dicroceros belometschetkense*, *Heteroprox* sp., *Paradicroceros flerovi*, *Palaeotragus* sp., *Paratragocerus sokolovi*, *Hypsodontus miocenicus* (Gabunia, 1973).

Il est de toute évidence que dans cette faune prédomine l'élément asiatique qui a pu pénétrer sur les territoires du Caucase du Nord, présentant au Miocène moyen une péninsule presque isolée, plutôt en provenance du Sud. Les Mammifères de cette région ont dû se développer dans des conditions assez particulières, liées à l'existence sur une presqu'île s'avançant loin dans la mer. Ce cachet original, s'exprimant dans une spécialisation poussée de certains représentants du complexe de Belometshetskaja et surtout dans leur adaptation à un milieu particulièrement humide, est spécialement reconnaissable chez les *Platybelodon*, *Caucasotherium*, *Kubanochoerus* (peut-être arrivé par migration de l'Afrique du Nord), *Paradicroceros* et autres.

La faune de Belometshetskaja est proche par son degré d'évolution de celle de Sansan ou plutôt de celle un peu plus ancienne de Devinska-Nova-Ves (Tchécoslovaquie).

Une étape suivante de l'histoire des Mammifères terrestres de la province mer Noire-Caspienne peut être caractérisée par la faunule de Korethi (Transcaucasie) du Karaganien marin, comprenant *Deinotherium* cf. *laevius*, *Gomphotherium angustidens*, *Aceratherium* sp., et *Listriodon splendens*. La présence de cette dernière forme, et peut-être aussi de *D.* cf. *laevius*, s'accorde assez bien avec un âge plus récent que celui du complexe de Belometshetskaja. Bien que n'ayant livré qu'un petit nombre d'espèces, le gisement de Korethi peut être placé au niveau de Steinheim.

Nous ne connaissons presque rien de la faune de Mammifères du Konkien, si l'on ne tient pas compte de l'indication sur les restes de *Deinotherium laevius* et de *Zygolophodon tapiroides*, trouvés dans le « Tortonien » supérieur de l'Ukraine (Dubrovo, Kapelist, 1979).

Nous sommes assez peu informés aussi sur les Mammifères terrestres du Konkien et du Sarmatien ancien ou Volhynien (début du Néomiocène en Europe orientale), mais on peut conclure, d'après quelques trouvailles isolées faites en Ukraine et sur les bords de la mer d'Azov, qu'à cette époque le territoire de la région mer Noire-Caspienne était encore peuplé par la faune à *Anchitherium*, cependant sensiblement appauvrie et, selon toute probabilité, contenant déjà des éléments de la faune à *Hipparion*. En effet, à côté de l'*Euprox* cf. *furcatus* et de l'*Aceratherium belaevae* on a trouvé dans les dépôts du Sarmatien inférieur de l'Ukraine des débris fossiles de *Machairodus* sp., *Aceratherium incisivum* et autres (Korotkevitsch, 1974 ; Pidoplicko, 1956 ; Pavlow, 1902). On pourrait placer vers le sommet du Sarmatien inférieur le gisement de Kryvoï-Rog (côte d'Azov), où a été signalée la coexistence d'*Amphicyon*, *Palaeomeryx* et *Hipparion* (Beliajeva, 1948), mais, à notre grand regret, la présence dans cette faunule de l'*Hipparion* n'a pas pu être vérifiée. Quoi qu'il en soit, la correspon-

dance du Sarmatien inférieur avec la partie sommitale du Miocène moyen (le niveau d'Anwil ou MN8 de l'échelle chronostratigraphique continentale) est fort probable.

Au Sarmatien moyen, ou Bessarabien (et même peut-être plus précisément au Bessarabien moyen), apparaît une faune à *Hipparion* déjà assez évoluée. Le niveau à *Hipparion* le plus inférieur se caractérise par la présence des *Sorex* sp., *Anomalomys gaillardi*, *Cotimus* sp., *Megacricetodon* sp., *Eumyarion* sp., *Spermophilinus bredai*, *Progonomys cathalai*, *Amphilagus fontannesi*, *Lagopsis* cf. *verus*, *Prouchotona eximia*, *Eomellivora* sp., *Ictitherium* sp., *Sansanosmilus piveteaui*, *Deinotherium* aff. *giganteum*, *Choerolophodon pentelici*, *Hipparion primigenium*, *Aceratherium* aff. *incisivum*, *Dicerorhinus* sp., *Schizochoerus vallesiensis*, *Cervavitus bessarabiensis*, *Dicrocerus* sp., *Lagomeryx flerovi*, *Palaeotragus expectans*, *Miotragocerus pannoniae* (Godina, David, 1973 ; Lungu, *sous presse*). Bien que cette faune ait des traits communs avec celle du Vallésien supérieur, elle doit, d'après son cachet d'archaïsme par rapport aux complexes néovallésiens de Masia del Barbo, Montredon et autres, être plutôt mise en équivalence avec la faune à *Hipparion* du Vallésien inférieur (NM 9, le niveau du Can Llobateres).

Cependant, on peut presque assurer que l'âge d'une faune à *Hipparion* aussi évoluée que celle de Kalfa a dû être précédée d'une assez longue période du développement. Cette période correspondrait à la partie sommitale du Volhynien ou au début du Bessarabien, quand dans la région mer Noire-Caspienne ont pénétré les premiers représentants de la faune à *Hipparion* et l'*Hipparion* lui-même. La faunule de Jeltokamenka du Sarmatien moyen de l'Ukraine, comprenant *Machairodus* sp., *Hipparion* sp. et *Palaeotragus expectans*, associés à *Gomphotherium angustidens*, *Anchitherium* sp., *Dicrocerus* sp. et *Lagomeryx* sp. (Dubrovo, Kapelist, 1979), pourrait être attribuée à cette étape initiale de propagation de la faune à *Hipparion*. Il est difficile de relever en Europe occidentale un niveau mammalogique correspondant exactement à la faunule de Jeltokamenka, mais si l'on se base sur la relative abondance des formes du Miocène moyen dans la faune à *Hipparion* de Doué (Ginsburg *et al.*, 1979), on pourrait admettre son équivalence probable avec celle du début du Sarmatien moyen. Une étape suivante du développement de la faune à *Hipparion* mésosarmatienne peut être caractérisée par le complexe de Varnitza, dont le gisement se place à un niveau stratigraphique nettement plus élevé que celui de Kalfa. Ce gisement nous a livré : *Dipoides* sp., *Palaeomys castoroides*, *Steneofiber jaegeri*, *Proochotona eximia*, *Percrocuta gigantea*, *Deinotherium giganteum*, *Gomphotherium* sp., *Hipparion* sp. (relativement évoluée), *Aceratherium* sp., *Dicerorhinus* sp., *Lagomeryx flerovi*, *Palaeotragus expectans*, *Miotragocerus leskevitschi* (Godina, David, 1973). Les gisements de Kalfa et de Varnitza comportent en commun sept genres et trois espèces. Cependant, ces formes présentent des traits plus archaïques à Kalfa qu'à Varnitza, ce qui nous conduit à admettre que ce dernier doit être rapporté, d'après le degré d'évolution de la faune, à la partie supérieure de la zone NM 9. On peut distinguer encore un niveau vers le sommet du Bessarabien, celui de Sébastopol (Borissiak, 1914) dont la faune se caractérise par la présence des espèces suivantes : *Ictitherium tauricum*, *Choerolophodon* sp., *Deinotherium* sp., *Hipparion sebastopolitanum*, *Chilotherium zernovi*, *Dicerorhinus* sp., *Palaeotragus expectans*, *Lagomeryx flerovi*, *Miotragocerus leskevitschi*, *Tragocerus* sp., *Tragoreas* sp.

La faune de Sébastopol est assez proche de celle de Varnitza, mais, si l'on en juge d'après l'apparition de *Tragocerus* et de *Tragoreas* et la spécialisation poussée de l'*Hipparion*, elle doit être un peu plus récente, se plaçant déjà vraisemblablement vers la base de NM 10.

Au Sarmatien supérieur, ou Khersonien, les hipparions semblent subir dans la province mer Noire-Caspienne une différenciation assez sensible : leurs représentants se distinguent les uns des autres par leur taille et la massivité des extrémités, ainsi que par le développement de la cavité préorbitaire et par une série d'autres caractères.

Se rapportant à cette période, le gisement de Kainary (Moldavie) a livré une faune riche en petits Mammifères, représentée d'après A. Lungu (1980), par *Galeryx* aff. *voesendorfensis*, *Spermophilinus* sp., *Monosaulax* sp., *Asiacastor kainarensis*, *Parapodemus lugdunensis*, *Myomimus* aff. *multicrestatus*, Sicistinae gen. indet., *Anomalomys* aff. *gaillardi*, *Rotundomys montisrotundi*, *Kowalskia* aff. *falbuschi*, *Alilepus* sp., *Proochotona* aff. *eximia* et autres. Cette faune, comportant à côté des immigrés asiatiques des espèces néovallésiennes, pourrait être mise en équivalence, selon Lungu, avec celles du Vallésien supérieur de la région méditerranéenne. Cependant, la présence dans ce complexe de Kainary d'un certain nombre de formes relativement évoluées (*Galeryx* aff. *voesendorfensis*, *Spermophilinus*, *Parapodemus* et *Kowalskia* aux affinités pannoniennes et autres) nous permet de lui attribuer un âge légèrement plus récent et de le rattacher au niveau le plus élevé du Vallésien supérieur.

La faune de Berislave du Khersonien de l'Ukraine est représentée par *Choerolophodon pentelici*, *Tetralophodon longirostris*, *Hipparion verae*, *Chilotherium sarmaticum*, *Microstonyx major*, *Palaeotragus berislavicus*, *Samotherium* sp., *Miotragocerus leskevitschi*, *Procapra depertita*, *Gadella schlosseri*, *Protragelaphus* sp., *Grecoryx* sp. et autres (Korotkevitch, 1970). Malgré les traits archaïques de certains membres du complexe de Berislave (*Chilotherium* et *Paleotragus* du Berislave sont visiblement moins évolués que les espèces des mêmes genres des époques plus tardives) et la persistance de *Miotragocerus leskevitshi*, indiquant, selon nous, l'appartenance de ce complexe encore au Vallésien supérieur, il se rapproche déjà manifestement de la faune turolienne.

Le complexe d'Eldar, provenant du Khersonien tardif de Transcaucasie, se caractérise par les espèces suivantes : *Ictitherium hipparionum*, *Percrocuta eldarica*, *Deinotherium* cf. *giganteum*, *Tetralophodon longirostris*, *Choerolophodon pentelici*, *Chalicotherium* sp., *Hipparion eldaricum*, *Aceratherium* aff. *incisivum*, *Dicerorhinus* sp., *Microstonyx major*, *Palaeotragus borissiaki*, *Mirabiloceros azerbaydjanicus*, *Miotragocerus* aff. *leskevitshi*, *Tragocerus* sp., *Gazella leilae*. L'abondance dans l'ensemble de cette faune de *H. eldaricum* à l'aspect archaïque (une forme trapue, se rapprochant de *H. primigenium*), *Microstonyx major*, *Miotragocerus* aff. *leskevitshi*, *Tragocerus* et *Mirabiloceras*, ainsi que la présence des *Deinotherium*, *Choerolophodon* et *Chalicotherium*, indiquent un habitat plutôt forestier et un climat humide. La distinction des équivalents exacts du Khersonien est assez difficile en dehors de la région mer Noire-Caspienne. C'est probablement le Vallésien terminal, constituant peut-être une seconde sous-unité de NM 10 (le niveau de Soblay et de Vösendorf ?), qui lui correspond dans la province méditerranéenne.

L'étape Méotien se caractérise par une extrême richesse des faunes de Mammifères. Les recherches des faunes à *Hipparion*, se rapportant dans la région mer Noire-Caspienne à des niveaux différents du Méotien, nous permettent de suivre les changements significatifs dans la composition de ces faunes, indiquant un accroissement progressif d'assèchement général du climat. Le Méotien inférieur, correspondant, selon nous, au Turolien inférieur (NM 11) de la province méditerranéenne, peut être caractérisé par les complexes d'Udabno de Transcaucasie (*Hystrix* sp., *Percrocuta* sp., *Udabnopithecus garedziensis*,

Deinotherium giganteum, Choerolophodon pentelici, Chalicotherium sp., *Hipparion garedzicum, Aceratherium incisivum, Palaeotragus* sp., *Tragocerus* sp., *Udabnocerus socolovi* et autres) et surtout du Grebeniki de l'Ukraine (*Erinaceus* sp., *Proochotona eximia, Alilepus laskarevi, Mesopithecus ucrainicus, Oricteropus gaudryi, Perunium ursogulo, Promephitis maeotica, Ictitherium hipparionum, I. robustum, Percrocuta eximia, Pogonodon copei, Metailurus boodon, Machairodus cultridens, Deinotherium giganteum, Tetralophodon longirostris, Hipparion giganteum, H. verae, Aceratherium incisivum, Chilotherium schlosseri, Microstonyx major, Palaeotragus rouenii, Cervavitus* sp., *Paloeoryx major, Protragelaphus skouzesi, Procapra brevicornis, P. deperdita, Gazella schlosseri* et autres.

Le premier de ces complexes, situé tout à fait à la base du Méotien, reflète encore des conditions de climat humide (*Udabnopithecus, Deinotherium, Choerolophodon, Chalicotherium*), tandis que le second indique une région de savane et de forêt clairsemée (l'abondance et la diversité des hipparions et des antilopes). La plupart des gisements de la faune à *Hipparion* se rapportent au Méotien moyen (Taraklia, Novoelisavetovka, Tshobrutshi et autres), qui se caractérise par la présence de *Proochotona eximia, Castor fiber, Hystrix bessarabica, Mustela leporinum, Ictitherium hipparionum, I. robustum, Lycyaena chaeretis, L. parva, Percrocuta eximia, Machairodus schlosseri, M. aphanistus* var. *tarakliensis, Deinotherium giganteum, Tetralophodon longirostris, Zygolophodon turicensis, Hipparion mediterraneum* (= *moldavicum*), *H. platygenys, Aceratherium incisivum, Dicerorhinus orientalis, Microstonyx major, Cervavitus variabilis, Eostyloceros* sp., *Palaeotragus roueni, Samotherium boissieri, Helladotherium duvernoyi, Tragocerus amaltheus, T. rugosifrons, Palaeoryx majori, P. stutzeli, Tragoreas oryxoides, Protragelaphus skouzesi, Procapra deperdita, Criotherium argaloides* et autres (la fréquence des *Struthio* est surtout à noter). Par leur constitution, les complexes faunistiques du Méotien moyen sont tellement proches de la faune mésoturolienne typique (NM 12) qu'on pourrait, à ce qu'il paraît, les considérer comme tout à fait contemporains.

La faune des Mammifères terrestres du Méotien tardif est principalement connue par les gisements de Tudorovo et d'Avgustovka (Ukraine), renfermant vingt-trois espèces, parmi lesquelles *Proochotono eximia, Parapodemus* sp., *Microtoscoptes* sp., *Percrocuta eximia, Plesiogulo crassa, Ictitherium hipparionum, Tetralophodon grandincisivum, Aceratherium incisivum, A. simplex, Dicerorhinus* sp., *Hipparion tudorovense, Tragocerus amaltheus, T. frolovi, Palaeoryx majori, Protoryx* sp., *Procapra deperdita caprina* (Korotkevitch, 1976 ; Dubrovo, Kapelist, 1979). Cette faune diffère de celle du Méotien moyen par un certain appauvrissement et par la présence de *H. tudorovense* et *A. simplex*, propres à ce niveau et visiblement plus évoluées que les espèces mésoméotiennes des mêmes genres, ainsi que par l'apparition de *Protoryx*, traduisant l'assèchement du climat accentué. Le complexe Tudorovo-Avgustovka correspond par son degré d'évolution à la zone NM 13 (Turolien tardif).

Nous sommes assez peu informés sur l'étape Pontien de l'histoire de la faune à *Hipparion*, marquant le début du Pliocène en Europe orientale. Néanmoins, les faciès typiques du Pontien inférieur et moyen de la région mer Noire-Caspienne ont livré un matériel significatif, appartenant aux espèces suivantes : *Tetralophodon* aff. *longirostris, Zygolophodon borsoni, Hipparion* sp., *Diceros* cf. *pachygnathus, Paracamelus* sp., *Eucladocerus* sp., *Paloeoryx pallasi*. En rapport avec cette faune mérite d'être mentionnée une faunule du Pontien inférieur ou moyen de la Bulgarie (Kojumdgieva, Nikolov, 1975), renfermant *Anancus*

arvernensis, *Zygolophodon borsoni*, *Hipparion praesulcatum* et *Dicerorhinus schleiermacheri*.

La présence dans le Pontien inférieur de l'Ukraine (calcaire d'Odessa) d'*Anancus arvernensis* typique et de *Paracamelus*, ainsi que d'un *Hipparion* de taille moyenne et trapu, assez proche de l'*Hipparion crassum*, nous conduit à admettre que cette faunule pourrait indiquer un âge légèrement plus récent que celle de l'Arquillo et Alcoy de la Méditerranée. Elle devrait être placée plutôt vers le sommet de la zone NM 13.

Nous sommes donc bien fondés à supposer que, dès le début du Pontien, les éléments de la faune plus récente, précurseurs du Ruscinien, pénétrèrent dans la province mer Noire-Caspienne.

Les trouvailles de Mammifères fossiles sont très rares dans le Kimmérien maritime. On peut mentionner pourtant la présence dans le Kimmérien de l'Ukraine de restes isolés d'*Anancus arvernensis*, d'un *Hipparion* de grande taille et d'un Bovidé (cf. Bubaline). Cependant, on doit rapporter, à notre avis, à cet étage (et peut-être partiellement au Pontien tardif) les faunes de Kossiakino (Caucase du Nord) et de Moldavie (complexe « Moldavien »), qui n'ont pu encore être placées avec pleine certitude en rapport avec un étage marin. Le complexe de Kossiakino (Caucase du Nord) renferme, outre les représentants de la faune ruscinienne (*Anancus arvernensis*, *Propotamochoerus provincialis*, *Tapirus arvernensis* et autres), des reliques de la faune turolienne, telles que *Deinotherium* sp., *Dicerorhinus* aff. *orientalis*, *Chilotherium* sp. En ce qui concerne l'*Hipparion* du Kossiakino, il révèle des affinités visibles avec espèces tardives aux tendances caballoïdes.

Le complexe moldavien (Godina, David, 1973 ; Dubrovo, Kapelist, 1979) est beaucoup plus riche que celui de Kossiakino mais, dans une certaine mesure, c'est une faune collective, dont une étude attentive permet déjà de distinguer deux stades : celui de Koutchurgan (Ukraine méridionale), plus ancien, et celui de Moldavie proprement dit, ou de Kagul et Salci plus récent. La faune de Koutchurgan peut être caractérisée par l'association *Zygolophodon borsoni*-*Hipparion* ex gr. *crassum*-*Dicerorhinus megarhinus*-*Eustylocerus pidoplitshkoi*-*Muntiacus pliocenicus* et plusieurs petits Mammifères, tels que *Miospalax macoveii*, *Promimomys moldavicus*, *Dolomys* aff. *milleri*, *Proochotona eximia*, *Alilepus ucrainicus*, *Pliolagus* sp. et autres.

A Kamenskoe (Ukraine), nous nous trouvons en présence d'une faune, probablement kimmérienne, se rapportant au niveau du Koutchurgan également : *Desmana verestchagini*, *Anourosoricodon pidoplitschkoi*, *Alilepus* sp., *Prolagus* sp., *Proochotona eximia*, *Ochotona antiqua*, *Steneofiber* sp., *Dolomys* sp., *Promimomys moldavicus*, *Hipparion* sp., *Procapreolus* sp. et autres (Dubrovo, Kapelist, 1979).

En ce qui concerne le niveau de Kagul et Salci, c'est l'abondance des *Anancus* et cerfs du sous-genre *Rusa* (Alexeeva, 1977) qui le caractérise surtout, ainsi que la présence des Rongeurs *Dolomys kowalskii*, *Mimomys* ex gr. *stehlini* et d'autres (Chevtshenko, 1965). Selon A. Skorik (1973), à ce niveau de Kagul doit être attribuée la faune de Mammifères des catacombes d'Odessa : *Proochotona gigas*, *Ochotona antiqua*, *O. pusilla*, *Alilepus ukrainicus*, *Orientalomys similis*, *Dolomys* sp., *Ursus arvernensis*, *Vulpes odessana*, *V. praecorsak*, *Homotherium crenatidens*, *Ananeus arvernensis*, *Paracamelus alexeevi* et autres.

En comparant les faunes de cet ensemble moldavien avec celles d'Europe occidentale, on peut attribuer la faune de Koutchurgan au Ruscinien inférieur (NM 14) et celle de Kagul et Salci au Ruscinien supérieur (NM 15).

La faune de type ruscinien se prolonge peut-être à l'Aktshagylien ancien dont les

Mammifères terrestres sont malheureusement très peu connus. Un riche gisement de Mammifères mésoaktshagylien en Transcaucasie (Kvabebi en Géorgie orientale) nous a livré de nombreux restes fossiles des membres de la faune ruscinienne, associés avec ceux de la faune plus récente, dite villafranchienne. Parmi les éléments indigènes de ce complexe, issus sans doute par évolution sur place des formes pontiennes ou kimmériennes, on peut noter *Kvabebyrax kakhethicus*, *Protoryx heinrichi*, *Gazella postmitilinii*, *Parastrepticeros sokolovi*, *Ioribos aceros*, *Eosynceros ivericus*. Quant au migrants, ce sont *Felis* (*Lynx*) *issiodorensis*, *Propotamochoerus provincialis*, *Oryx* sp. et quelques autres. Mais ce qu'on doit surtout mentionner, c'est la présence dans cette faune de *Hipparion crusafonti*, qui nous permet de suivre dans les provinces Ponto-Caspienne et Méditerranéenne le même stade terminal du développement de la faune ruscinienne ; quand bien même la faune à *Hipparion crusafonti* de Kvabebi, d'apparence plus archaïque que celle de l'Europe occidentale (Villaroya), doit être considérée, selon nous, comme relativement plus ancienne, appartenant à la partie sommitale du Ruscinien supérieur (ou fin du NM 15).

Avec l'Aktshagylien avancé débute la faune de Khapry, comprenant les premiers Archidiscodons et aussi probablement les Équidés. Elle se caractérise également par une large répartition de *Dicerorhinus etruscus*, des Cervidés *Eucladoceros* et *Cervus*, de l'Antilopiné *Gazellospira*, du Boviné *Leptobos* et autres (Alexeeva, 1977). Quant aux *Machairodus*, *Ananeus*, *Hipparion* et quelques autres, hérités du Kimmérien, ils sont relativement rares dans ce complexe khaprovien.

La faune des petits Mammifères de Khapry est représentée par *Desmana* sp., *Talpa* sp., *Alilepus* sp., *Ochotona antiqua*, *Apodemus* sp., *Pliomys ucrainicus*, *P. hungaricus*, *Villanyia petenyi*, *Mimomys* cf. *stehlini*, *M.* cf. *reidi*, *M. pliocaenicus* et autres (Dubrovo, Kapelist, 1979).

A l'Aktshagylien avancé doit être rattachée la première étape du développement de la faune khaprovienne considérée dans la région mer Noire-Caspienne comme équivalent assez exact de la faune éo- et mésovillafranchienne (NM 16, ou Villanyen inférieur) de l'Europe occidentale.

La seconde étape, correspondant déjà à l'Apshéronien inférieur, se caractérise par l'apparition des *Lagurodon* (*L. arankae*, *L. praepannonicus*), *Allophayomys plicaenicus* et d'autres (Chevtshenko, 1965) et par la présence de l'*Archidiskodon meridionalis* et *Equus stenonis* typiques. Cette faune néokhaprovienne, qui constitue pour certains auteurs le complexe d'Odessa, doit être attribuée au Villanyen supérieur (NM 17/Q). Donc, en ce qui concerne les Mammifères, surtout la faune de Rongeurs, une coupure bien accentuée apparaît entre l'Aktshagylien et l'Apshéronien, qui coïncide avec un refroidissement peut-être léger (Nikiforova *et al.*, 1976) et correspondrait approximativement à la base du Villafranchien supérieur, ou du Calabrien de l'échelle européenne du Cénozoïque, recommandée généralement comme la limite Néogène-Quaternaire.

D'après nos connaissances actuelles, il est difficile de paralléliser des faunes de Mammifères en se basant sur la communauté des espèces, souvent insuffisamment étudiée, mais la correspondance des étapes bien caractérisées de leur évolution est beaucoup moins douteuse. En prenant pour base ces corrélations principales et en utilisant des données de l'âge absolu, nous avons essayé d'établir une synchronisation des faunes de Mammifères du Néogène des régions mer Noire-Caspienne et Méditerranéenne, ce qui est exprimé dans un tableau d'équivalences, que nous présentons ici comme conclusion à nos réflexions (tableau I).

M.Y.	Easter Paratethys: Regional stages	Easter Paratethys: Mammal localities	Central Paratethys: Regional stages	Central Paratethys: Mammal localities	Turkey: Mammal localities	Greece: Mammal localities	Western Europe: Mammal localities	NM (Mein)	Mammalian Ages
		Taman					Peyrolles Seneze		
1	Apsheronian		Pleistocene	Villany 3	Yukari Söğütönü			17	
		Odessa					Le Coupet		Villanyian
2				Hajnacka	Gulyazi	Damatria	St. Vallier		
3	Aktshagylian	Khapry Kvabebi	Rumanian	Rebielice Csarnota			Roccaneyra Etouaires	16	
						Apolakkia	Viallete		
4		Kagul		Ivanovce	Çalta		Layna	15	
	Kimmerian	Kutshurgan	Dacian	Weze			Perpignan Montpellier		Ruscinian
5		Kossiakino		Podlesice	Dinar-Akçaköy	Maritsa	Hautimagne Hauterives	14	
6	Pontian	Mamay	Pontian	Hrabarsco		Alatini	Alcoy Arquillo	13	
				Polgardi	Amasya	Samos 5	Luberon		
7		Tudorovo			Kinik	Kalithies		12	
8	Maeotian	Taraklia		Eichkogel Kohfidisch		Salonique	Los Mansuetos		Turolian
		Novoelisavetovka			Garkin	Pikermi			
9			Pannonian	Vösendorf	Kayadibi	Samos 1-4	Crevillente 3	11	
		Grebeniki							
10		Berislav		Csakvar	Esme-Akçaköy		Masia del Barbo	10	
11		Eldar		Geiselberg		Kastellios	Montredon		Vallesian
		Varnitsa		Drassburg	Yeni-Eskihisar 2		Can Llobateres		
12	Sarmatian	Kalfa					Nombrevilla	9	
				Rudabanya	Yaylacilar	Chios	Doué		
13			Sarmatian	„Vienna"	Yeni-Eskihisar 1	Plakia	Anwil La Grive	8	
14							St. Gaudens		
	Konkian			Göriach					
15	Karaganian	Korethi		Neudorf-Sanderg	Sofça		Steinheim Simorre	7	Astarcian
16			Badenien				Sansan		
17	Tshokrakian	Belometshetskaya		Devinsko-Novo Ves	Çandir		Arroyo del Val	6	
					Paşalar		Pontlevoy		
18			Karpatian				Las Planas Lisboa Vb	5	
19	Tarkhanian	Ksylbulak		Frantiskovy L			Suèvres		Orleanian
20							Baigneaux La Romieu	4	
21	Kozakhurian	Kintyktshe	Otnangian	Orechov			Lisboa IV-Va		
22	Sakaraulian	Bishtubia	Eggenburgian	Tuchorice			Wintershof-West Estrepouy Lisboa I	3	
23	Caucasian	Agispe	Egerian				Laugnak Paulhiak	2 1	Agenian
24									

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alekseeva, L. I., 1977. — Early Antropogene theriofauna of East Europe. *Trudy Inst. geol. Nauk, Mosk.*, **300** : 214 p. M.

Beliajeva, E. I., 1948. — Catalogue of the Tertiary mammals localities on the territory of the USSR. *Trudy Inst. Paleont. Nauk, Mosk.*, **15**, M.

— 1954. — New data on Tertiary Rhinocerotidae from Hazakhstan. *Trudy Inst. Paleont.*, **47** : 24-54.

Bendukidze, O. G., 1977. — On the biostratigraphy of the Miocene deposits of the north-western coast of the Aralian sea. Inst. of Paleobiology of Acad. Sci. of Georgia. Theses. Tbilisi, « Metsniereba ».

Biliukov, M. D., M. E. Voskobonikov & P. F. Savinov, 1968. — Contribution à la stratigraphie du Néogène de Kazakhstan. *Izv. Akad. Nauk kazakh. SSR*, Seria geologitsheskaia, **2** : 33-47.

Borissiak, A. A., 1954. — About ancient *Aceratherium* from Kazakhstan. *Trudy Inst. Paleont.*, **47** : 5-23.

Gabrielian, A. A., & L. K. Gabunia, 1959. — Sur la présence d'un Mastodon dans la série bariolée de Nakhitshevan. *Dokl. Akad. Nauk armian. SSR*. **28** (4) : 13-17.

Gabunia, L. K., 1964. — The oligocene vertebrate fauna from Benara. Tbilisi, « Metsniereba » : p. 266.

— 1970. — Sur la signification des faunes de Mammifères du Miocène supérieur et du Pliocène de la région Ponto-Caspienne. *Giorn. Geol.*, ser. 2 a, **35** (1) : 161-170.

— 1973. — The fossil vertebrate fauna from Belomechetskaja. Tbilisi, « Metsniereba » : p. 136.

Ginsburg, L., Ph. Janvier, I. Mornand & D. Pouit, 1979. — Découverte d'une faune de Mammifères terrestres d'âge Vallésien dans le falun miocène de Doué-la-Fontaine (Maine-et-Loire). *C. r. somm. Séanc. Soc. géol. Fr.*, fasc. 5-6 : 223-227.

Godina, A. I., & David, A. I. 1973. — Neogene vertebrates localities on the territory of Moldavian SSR. « Stinitsa », Kishinev.

Dubrovo, I. A., & K. V. Kapelist, 1979. — Catalogue of Tertiary vertebrates localities of Ukraine. « Nauka », Moscow.

Kojumdgieva, E., & I. Nikolov, 1975. — Nouvelles données sur la distribution stratigraphique des faunes néogènes des Vertébrés dans l'Europe du Sud-Est. VIth Congr. of the C.M.N.S., Bratislava : 347-348.

Korotkevich, S. L., 1976. — Late Neogene gazelles of Northern Black Sea coast. « Naukova Dumka », Kiev.

Lavrov, V. V., O. G. Bendukidze, I. V. Vassiliev, L. I. Melkonian, I. A. Nikolaeva, L. A. Panova, E. I. Saperson & N. V. Tolstikova, 1978. — Horizon stratigraphique d'Aral du Néogène des régions Aralo-Tourgaiennes. *In* : Paléogène et Néogène de Sibérie. « Nauka », Novosibirsk : 128-132.

Lungu, A. N., 1980. — Nouvelles données concernant la faune de Vertébrés terrestres du Sarmatien avancé de Moldavie. Faunes et flores néogènes et quaternaires de Moldavie. « Stinitsa », Kishinev : 3-8.

— *Sous presse.* — Les rongeurs du Sarmatien de Moldavie. « Stinitsa ». Kishinev.

Nikiforova, K. V., I. I. Krasnov, L. P. Aleksandrova, Y. M. Vasiliev, V. A. Konstantinova & A. L. Chepalyga, 1976. — Climatic fluctuations and detailed Stratigraphy of Upper Pliocene — Lower Pleistocene of southern USSR. *In* : Quaternary Geology, « Nauka » : 101-120.

Pavlow, M., 1902. — Ossements fossiles trouvés dans les environs de Kriwoï Rog, gouvernement de Kherson. *Bull. Soc. Nat., Moscou*, N 1-2.

Pidopličko, I. G., 1956. — Materials for the study of extinct faunae of Ukrain SSR, « Naukova Dumka », Kiev, **2** : 23-35.

Skorik, A. F., 1973. — Rodentia from the Tiligul Late Pliocene fauna. Theses, « Naukova Dumka », Kiev.

Shevtshenko, A. L., 1965. — Basal Complexes of Micromammals of Pliocene and Lower Antropogene from South-Western part of Russian plain. *In* : Stratigraphic significance of Antropogene micromammalian fauna. Moscow, « Nauka ».

Vekua, A. K., 1972. — The Akchaghylian vertebrate fauna from Kvabebi. « Nauka » : 1-336.

Bull. Mus. natn. Hist. nat., Paris, 4e sér., **3**, 1981,
section C, nº 2 : 205-208.

Paléobiogéographie des Gastéropodes néogènes et quaternaires dans le domaine occidental de l'Ancien Continent

par Philippe Brébion *

Résumé. — Étude de l'évolution des faunes cénozoïques de Gastéropodes marins dans les régions eurafricaines occidentales en fonction des changements climatiques et formation des provinces biogéographiques actuelles.

Abstract. — Survey of the evolution of the Cenozoic fauna of marine Gastropoda in West Euroafrican area according to climatic variations and formation of the present biogeographical provinces.

Uniformité relative de la faune au Miocène inférieur

Dans le domaine occidental de l'ancien continent, vers la limite du Miocène inférieur et moyen, les faunes de Gastéropodes marins montrent une grande uniformité. Cette dernière s'explique par une certaine unité climatique de type tropical et par la facilité des communications entre les mers. A vrai dire ces phénomènes sont à cette époque très largement répandus.

Ainsi, dans nos régions, le bassin du Nord se trouve-t-il annexé, au point de vue paléobiogéographique, à la grande province atlanto-méditerranéenne dont le centre de gravité se situe non seulement en Méditerranée mais aussi en Afrique occidentale, région beaucoup moins bien connue, mais tout à fait identique à la précédente. Toutefois, on observe une légère atténuation des caractères fauniques en remontant le long des côtes ouest-européennes, sans doute en raison d'un rafraichissement progressif de la mer. Par exemple, les Strombes, déjà rares dans le golfe ligérien, ne sont plus représentés dans la mer du Nord où persistent en revanche un certain nombre de coquilles septentrionales, et dont la faune est appauvrie par rapport à l'Atlantique. Ce bassin constitue en quelque sorte une sous-province de l'ensemble atlanto-méditerranéen. En fait, les variations, au sein de cette province, sont surtout constituées par des endémismes très localisés que l'on rencontre en Europe dans des golfes profonds et en Afrique dans les îles éloignées du rivage.

Évolution climatique et régionalisation progressive au cours du Cénozoïque

Le Burdigalien correspond à un maximum thermique. A partir du niveau de Saubrigues en Aquitaine (Langhien), on note un refroidissement continu et d'autant plus marqué que l'on est à plus haute latitude. Il en résulte de profonds changements dans la répartition

* *Institut de Paléontologie, Muséum national d'Histoire naturelle, 8, rue de Buffon, 75005 Paris.*

des Gastéropodes qui sont des Mollusques très sensibles aux variations de la température. Ces changements sont visibles à l'échelle des genres et des familles dont beaucoup sont liés à des conditions climatiques précises. Il est donc possible d'analyser des faunes médiocrement conservées où la détermination n'a pu être poussée au niveau de l'espèce.

Dès le Miocène on connaît dans le Pacifique Nord une région plus froide où se constitue une faune particulière (Buccinidae divers, Littorines, Pourpres du genre *Nucella*, etc.). Celle-ci se répand largement à la suite de l'abaissement de la température des eaux dans les mers avoisinantes. Le passage en Europe se fait par le détroit de Bering. Les espèces migratrices deviennent de plus en plus nombreuses au cours du Néogène et s'étendent de plus en plus loin en direction du sud, mais surtout au Quaternaire.

Parallèlement, les formes chaudes se cantonnent progressivement dans les régions méridionales et ceci tout au long du Néogène. Mais les deux phénomènes sont relativement indépendants ; si l'invasion des espèces septentrionales dans le bassin du Nord est continue, le retrait des espèces méridionales s'effectue plutôt par vagues (Miocène terminal, Pliocène terminal). Plus au sud les départs sont plus échelonnés, tandis que la pénétration de la faune nordique ne prend de l'amplitude qu'à une date tardive.

Il résulte de ce double mouvement de faune une grande difficulté à dégager la signification stratigraphique des espèces, car celle-ci varie en fonction de la région envisagée. A chaque étage on constate, en un lieu donné, de nouveaux apports ou de nouveaux retraits. La chronologie est liée à la climatologie.

La province nordique se reconstitue à partir du Miocène terminal et s'individualise de plus en plus au cours du Pliocène. En revanche, les faunes ouest-européennes appartiennent encore, quoique de façon atténuée, à l'ensemble atlanto-méditerranéen. Le renversement d'équilibre s'amorce au début du Quaternaire. On l'observe dans le Cotentin grâce à la découverte récente d'un gisement où les coquilles nordiques font une nette apparition. L'âge en est tiglien (= antien) ou waalien[1]. Nous manquons malheureusement de données concernant les régions plus méridionales de l'Europe occidentale.

Au Quaternaire, l'évolution cyclique du climat se répercute avec intensité sur les faunes de Gastéropodes dont l'intérêt à cette époque est sans équivalent dans le monde des Invertébrés marins. A titre indicatif, au Maroc atlantique il a été possible de définir sept biozones dans le Pléistocène.

Nuances et particularités

Les vues d'ensemble exposées ci-dessus sont évidemment schématiques. En fait, les réalités observées sont plus complexes. La répartition de certaines formes ne s'explique pas apparemment par des considérations d'ordre climatique. C'est le cas du genre *Olivancillaria* présent en Atlantique, à l'exclusion de la Méditerranée, et du genre *Scaphella* rare au sud de l'Aquitaine et même inconnu en Afrique occidentale sauf au Maroc.

On connaît des influences lointaines en dehors de la venue des formes nordiques indiquées plus haut. Les Acanthines (*Acanthina* et *Acanthinucella*), apparues au Miocène moyen, semblent d'origine américaine. Il n'est pas toujours possible, faute de jalons paléontolo-

1. De nouvelles et abondantes récoltes m'ont amené à réviser l'opinion émise en 1976 qui était fondée sur l'étude d'un matériel réduit et non représentatif.

giques, de préciser le sens des migrations. Ainsi, le genre *Hartungia* est propre au Néogène d'Australie et d'Afrique occidentale, sans que l'on puisse en dire davantage. L'origine du genre *Cymbium* (= *Yetus*), apparu dans le Tortonien de Rabat et depuis très répandu sur les côtes ouest-africaines, n'a pu être découverte avec certitude. Il est devenu classique depuis plus d'un demi-siècle de parler d'une influence chilo-péruvienne à la fin du Pliocène et au début du Quaternaire marocains. Une telle hypothèse ne peut être retenue.

Les conditions de température requises par les Gastéropodes semblent s'être modifiées au cours des temps. On voit parfois cohabiter dans un même gisement des formes appartenant aujourd'hui à des provinces climatiques très différentes. C'est dans le Pliocène anglais qu'un tel mélange atteint une ampleur maximum. Beaucoup de coquilles de mer chaude se sont maintenues, alors que de nombreuses coquilles de mer froide ont déjà fait leur apparition. On constate dans plusieurs genres une opposition climatique entre les représentants fossiles et actuels. Par exemple, *Concholepas* vivait au Miocène moyen parmi les faunes tropicales d'Aquitaine et du golfe ligérien ; aujourd'hui il est cantonné dans les eaux plus tempérées de la province chilo-péruvienne.

La province guinéenne actuelle et l'héritage de la faune miocène

De nos jours la faune miocène traditionnelle, et plus précisément celle du Serravallien, assez notablement modifiée dans sa composition générique, se retrouve dans la province guinéenne. Plus au nord elle ne survit que partiellement, mélangée à des éléments nordiques dont la présence est devenue exclusive dans la province boréale. L'étude des faunes guinéennes récentes ne peut s'effectuer sans la connaissance préalable des faunes néogènes atlanto-méditerranéennes. Si la majorité des espèces se sont renouvelées, plusieurs ont persisté ou du moins ont donné naissance à des sous-espèces plus récentes.

Les conditions climatiques qui régnaient au Miocène ne sont pas exactement celles de l'Afrique occidentale actuelle. Cette province est plus froide que les autres provinces tropicales contemporaines. Beaucoup de formes se sont éteintes localement. Certaines ne l'ont fait qu'à une date tardive, comme les Pirules encore présentes au début du Quaternaire et les Acanthines qui ont survécu jusqu'à l'Ouljien (= Eutyrrhénien). Inversement, cette province ouest-africaine a acquis une personnalité nouvelle par rapport à l'époque miocène. Celle-ci se traduit essentiellement par l'abondance de coquilles de très grande taille se rapportant au genre *Cymbium* et par le développement des Marginellidae représentées par de nombreuses espèces, généralement plus grandes qu'au Miocène. Ces dernières tiennent la place des Porcelaines peu répandues dans la province et qui se sont surtout maintenues dans le monde indo-pacifique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brébion, Ph., 1972. — Paléobiogéographie des Gastéropodes du Pliocène atlanto-méditerranéen. *Bull. Mus. natn. Hist. nat., Paris*, 3e sér., nº 50, Sci. Terre 8 : 17-34, 1 tabl.

— 1975. — Les Gastéropodes du Miocène atlantique. *Mém. B.R.G.M.* (5e Congr. Néogène méditerranéen, Lyon 1971), 1974, **1** (78) : 279-285.

— 1979. — Étude biostratigraphique et paléoécologique du Quaternaire marocain. *Annls Paléont. Invertéb.*, **65** (1) : 1-42, 1 carte, 5 tabl.

Brébion, Ph., et J. Brunet, 1973. — La limite Plio-Pléistocène dans le domaine européen nord-occidental d'après les faunes de Gastéropodes ; corrélation continentale d'après la répartition des Équidés. *Bull. Mus. natn. Hist. nat., Paris*, 3e sér., no 129, Sci. Terre 21 : 1-13,

Brébion, Ph., E. Buge, G. Fily, A. Lauriat, J. P. Margerel, et Cl. Pareyn, 1976. — Le Quaternaire ancien de Saint-Nicolas de Pierrepont et Saint-Sauveur de Pierrepont (Manche). *Bull. Soc. linn. Normandie*, **104** (1973-1974) : 70-106, 5 fig., 2 pl., 3 tabl., 1 carte.

Wyatt Durham, J., et F. Stearns MacNeil, 1967. — Cenozoic migrations of marine Invertebrates through the Bering Strait Region. The Bering Land Budge — 18, Stanford, Californie : 709-739, 4 tabl.

Achevé d'imprimer le 16 octobre 1981.

Le 1er trimestre de l'année 1981 a été diffusé le 30 juillet 1981.

IMPRIMERIE NATIONALE

1 564 002 5

Recommandations aux auteurs

Les articles doivent être adressés directement au Secrétariat du *Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle*, 57, rue Cuvier, 75005 Paris. Ils seront accompagnés : de la traduction du titre en anglais, d'un résumé en français et en anglais, de l'adresse du Laboratoire dans lequel le travail a été effectué (en note infrapaginale sur la première page).

Le *texte* doit être dactylographié à double interligne, avec une marge suffisante, recto seulement. Pas de mots en majuscules, pas de soulignages (à l'exception des noms de genres et d'espèces soulignés d'un trait). Il convient de numéroter les *tableaux* et de leur donner un titre ; les tableaux importants et complexes devront être préparés de façon à pouvoir être clichés comme des figures.

La liste des *références bibliographiques*, à la fin de l'article, devra être présentée par ordre alphabétique des noms d'auteurs, chaque référence étant indiquée ainsi : auteur, initiales du (ou des) prénom, date, titre d'article ou d'ouvrage (en entier), revue abrégée selon la *World list of Scientific Periodicals*, tome (souligné), numéro (entre parenthèses), deux points, pagination et illustrations.

Les *dessins et cartes* doivent être réalisés à l'encre de chine. Les *photographies* seront le plus nettes possible et tirées sur papier brillant. Tenir compte de la justification du Bulletin : 14,5 cm × 19 cm. L'auteur devra indiquer l'emplacement des figures dans la marge de son manuscrit. Les légendes seront regroupées à la fin du texte sur un feuillet séparé.

Tirés à part : 50 tirés à part seront fournis gratuitement par article. Les auteurs peuvent éventuellement commander des tirés à part supplémentaires qui leur seront facturés directement par l'Imprimeur.

MÉMOIRES DU MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

Collection à périodicité irrégulière. Paraît depuis 1935. A partir de 1950, les Mémoires se subdivisent en quatre séries spécialisées : A, Zoologie ; B, Botanique ; C, Sciences de la Terre ; D, Sciences physico-chimique. (Format in-4°.)

Dernières parutions dans la série C

T. 41 — Gaudant (Mireille). — Recherches sur l'anatomie et la systématique des Cténothrissiformes et des Pattersonichthyiformes (Poissons Téléostéens) du Cénomanien du Liban. 1978, 124 p., 57 fig., 10 pl. h.-t.

T. 42 — Lange-Badré (Brigitte). — Les Créodontes (Mammalia) d'Europe occidentale de l'Éocène supérieur à l'Oligocène supérieur. 1979, 249 p., 32 fig., 48 gr., 30 pl. h.-t.

T. 43. — Recherches océanographiques dans l'océan Indien. (Entretiens du Muséum, Paris, 20-22 juin 1977.) 1979, 253 p., fig. pl.

T. 44 — Gayet (Mireille). — Contribution à l'étude anatomique et systématique des Poissons Cénomaniens du Liban anciennement placés dans les Acanthoptérygiens. 1980, 151 p., fig., 29 pl.

A paraître

T. 45 — Lauriat-Rage (Agnès). — Les Bivalves du Redonien (Pliocène atlantique de France). Signification stratigraphique et paléobiogéographique.

Ouvrages disponibles au Service de Vente des Publications du Muséum,
38, rue Geoffroy Saint-Hilaire, 75005 Paris


MUSEUM
NATIONAL
D'HIST.NAT.